

**Sostenibilidad Ambiental: Una Aproximación Desde La Física
Termodinámica Al Análisis Económico De La Producción De Café En
Colombia.**

Una Trabajo Presentado Para Obtener El Título De
Economista
Corporación Universidad Piloto de Colombia, Bogotá

Mateo Linares Santana.
Septiembre 2015.

Agradecimientos

¡Infinitas gracias a Dios!, Jesús, nunca dejaste de creer en mi aunque no
tenía mucho para dar.

Resumen

Este trabajo busca determinar si la producción de café en Colombia es sostenible desde el enfoque de la Termo-economía; entendiendo sostenibilidad como la capacidad de producir en el presente sin comprometer la producción futura, mediante la formulación de una metodología de análisis aplicable a diferentes tipos de contextos. Para ello, se exponen algunos antecedentes de aplicaciones de la Termo-economía con el fin de traer a colación el concepto del Principio Extremal de Prigogine el cual permite encontrar niveles mínimos de entropía (siempre y cuando el sistema se encuentre en estado estacionario estable) y constituye la base central de este análisis termodinámico de la sostenibilidad. Paralelamente se plantea que la pérdida de suelo compromete la productividad y que el manejo integrado de arvenses es la principal herramienta de mitigación; de esta manera solo en la medida que este costo sea mínimo los productores se verán incentivados a implementarla garantizando la sostenibilidad de la producción. Finalmente se emplea el modelo expuesto por Tsirlin y Kazakov en el análisis de sistemas microeconómicos abiertos para calcular la entropía (costo oculto para mitigar la erosión) y mediante herramientas econométricas de series de tiempo como la estimación de un modelo VEC o los test de Dickey-Fuller y la prueba de Chow se verifican las condiciones de estacionariedad y estabilidad, encontrando que si bien los incrementos de las variables que definen el sistema pueden ser estacionarios, estos no son estables; razón por la cual el valor de la entropía encontrado no es un mínimo óptimo y por ende la producción de café no es sostenible.

Palabras clave: Termodinámica, entropía, costo de erosión, Estacionariedad, estabilidad, Principio Extremal de Prigogine

Clasificación JEL: Q10, Q33, Q56

Abstract

This paper seeks to determine whether coffee production in Colombia is sustainable from the perspective of the thermo-economy; understanding sustainability as the ability to produce in the present without compromising future production, through the development of a methodology of analysis applicable to different types of settings. To do this, some background applications Thermo-economy exposed in order to bring the concept of Extremal Principle Prigogine which to find minimum levels of entropy it up (as long as the system is stable steady state) and It is the central base of the thermodynamic analysis of sustainability. Parallel is proposed that the loss of soil productivity and agrees that integrated weed management is the main tool of mitigation; in this way only to the extent that this cost is minimal producers will be encouraged to implement to ensure the sustainability of production. Finally, the example given by Kazakov in Tsirlin and open microeconomic analysis systems to calculate the entropy (hidden cost to mitigate erosion) and using econometric time-series tools as estimating a VEC model or test used Dickey Fuller and Chow test stationarity conditions and stability are checked and found that although the increases in the variables that define the system may be stationary, they are not stable; why entropy value found is not an optimal minimum and therefore coffee production is not sustainable.

Keywords: thermodynamics, entropy, erosion cost, Stationarity, stability, extremal principle of Prigogine

JEL Classification: Q10, Q33, Q56

Glosario

Antropoceno: Era del hombre, periodo caracterizado por los impactos del proceder humano en los ecosistemas

Cinética: movimiento, en termodinámica se emplea el termino de energía cinética para referirse a la energía creada por el movimiento de los cuerpos

Cuerpo Negro: objeto que absorbe toda luz o energía radiante que incide sobre él, a su vez tiene la capacidad de emitir luz (radiación de cuerpo negro)

Driving forces: fuerzas motrices o atractoras, describen la dirección de un flujo de recursos o energía (entrada o salida del sistema).

Ecosistema: sistema natural conformado por un conjunto de organismos bióticos que interactúan con su medio físico y cuyos procesos vitales están relacionados entre sí.

Energía Interna: es la suma de todas las energías de los componentes de un sistema, es decir la energía a escala macroscópica.

Energía Libre: energía que se obtiene a través de fenómenos físicos de manera espontánea y que está disponible para realizar un trabajo termodinámico.

Entalpía: es la suma de la energía interna y la energía cedida o absorbida por un sistema termodinámico, su variación expresa la cantidad de energía intercambiada de un sistema con el entorno

Entropía: medida del desorden (o distribución aleatoria) de un sistema, en termodinámica hace referencia a la energía disipada durante un proceso que no puede convertirse en energía en forma de trabajo

Exergía: en la interacción de un sistema con su entorno es la energía que puede convertirse en trabajo.

Flujo convectivo: flujos de materia (recursos) o energía generados por factores externos, por ejemplo, la transferencia de calor mediante un fluido (convección)

Flujo Difusivo: flujos de materia (recursos) o energía generados por interacción de un sistema con su entorno (o de un macro sistema con otro)

Holoceno: última época geológica del periodo cuaternario, caracterizada por una estabilidad térmica que ha permitido la subsistencia el ser humano.

Negantropía: es la entropía que exporta un sistema para mantener su entropía baja a nivel interno compensando así el proceso de degradación sistémica.

Principio Extremal de Prigogine: “cuando un sistema abierto está en condiciones que le permiten alcanzar un estado de no equilibrio estacionario y estable, este se auto organiza de modo que minimiza la producción total de entropía definida localmente” (Tsirlin & Kazakov, 2005)

Termodinámica: rama que estudia la relación entre un sistema y su entorno mediante los flujos de materia y energía.

Trabajo: forma de energía que se transfiere desde el sistema hacia el entorno o viceversa, modificando los límites del sistema, desplazando objetos o generando otros flujos de energía.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	viii
Lista de tablas	x
Lista de figuras.....	xii
Introducción	1
Justificación y planteamiento del problema.....	6
Objetivos	8
Capítulo 1 Marco teórico	10
1.1. Economía ambiental.....	12
1.2. Economía ecológica	13
1.2.1. Los limites planetarios.	16
1.2.2. La Física Termodinámica en la Economía.....	18
Capítulo 2 Revisión de literatura previa	29
2.1. El análisis termo económico	29
2.1.1. Función de demanda como proceso termodinámico.....	30
2.1.2. La producción conjunta.....	31
2.1.3. Sistemas microeconómicos abiertos.	32
2.2. Critica a la termo – economía	34
2.3. Estudio de la erosión en suelo cafetero de Colombia	36
Capítulo 3 Marco metodológico: Definición del modelo	46
Capítulo 4 Aplicación del modelo	52

4.1. Estimación del modelo VEC.....	55
4.2. Análisis individual de las variables.....	60
4.2.1 Estacionariedad	60
4.2.2. Estabilidad.....	69
4.3. Calculo de la entropía (costo oculto por erosión)	75
Capítulo 5 Conclusiones.	78
Lista de referencias	82
Anexos	87
Calculo del IPP agrícola años anteriores a 1970.....	87
Estimación del costo total promedio por hectárea de café.....	88
Transformaciones Box – Cox	92
Estimación del modelo VEC.....	1
Estimación del modelo SARIMA para las toneladas producidas (0, 1, 2) X (12, 0, 0) ₁₂	4
Estimación del modelo GARCH para el precio representativo del café.....	7
Estimación del modelo GARCH para el coto total promedio por hectárea de café.....	10

Lista de tablas

Tabla 1. Limites ecológicos al crecimiento.	15
Tabla 2. Intensidad de lluvias y pérdidas de suelo. Chinchiná, Colombia.	38
Tabla 3. Suelo perdido por erosión en terrenos desyerbados con azadón y con machete, en suelos Dystropepts. Cenicafe (1949 - 1950) (Suárez de Castro, 1951).	43
Tabla 4. Test de causalidad de Granger.	56
Tabla 5. Test de cointegración de Johansen.....	56
Tabla 6. Test de raíz unitaria: toneladas producidas I(1) S(12).....	63
Tabla 7. Test de raíz unitaria: hectáreas cosechadas I(1) S(12).....	65
Tabla 8. Test de raíz unitaria: precio dólar por tonelada I(1)	67
Tabla 9. Test de raíz unitaria: Costo total promedio, dólar por tonelada I(1).....	69
Tabla 10. Prueba de Chow: Toneladas producidas 1974M02	72
Tabla 11. Prueba de Chow: Toneladas producidas 1975M02.	72
Tabla 12. Prueba de Chow: Toneladas producidas 1996M02.	72
Tabla 13. Prueba de Chow: Toneladas producidas 1997M02.	72
Tabla 14. Prueba de Chow: Precio representativo 1974M09.	72
Tabla 15. Prueba de Chow: Precio representativo 1975M08.	73
Tabla 16. Prueba de Chow: Precio representativo 1989M07.	73
Tabla 17. Prueba de Chow: Precio representativo 1994M05.	73
Tabla 18. Prueba de Chow: costo total promedio dólar por tonelada 1962M12.	74
Tabla 19. Prueba de Chow: costo total promedio dólar por tonelada 1965M09.	74
Tabla 20. Prueba de Chow: costo total promedio dólar por tonelada 1972M01.	74

Tabla 21. Prueba de Chow: costo total promedio dólar por tonelada 1973M01.	74
Tabla 22. Costos promedio por hectárea de producción de café en Antioquia.....	89
Tabla 23. Costos promedio por hectárea de producción de café en Eje Cafetero.	89
Tabla 24. Costos promedio por hectárea de producción de café en Tolima Grande.	90
Tabla 25. Costos promedio por hectárea de producción de café en Costa Atlántica.....	91
Tabla 26. Costos promedio por hectárea de producción de café en Cauca Nariño.	91
Tabla 27. Tipo de transformación según el valor de λ	93
Tabla 28. Metodología Box - Cox: Toneladas producidas.	93
Tabla 29. Metodología Box - Cox: Hectáreas cosechadas.	94
Tabla 30. Metodología Box - Cox: Precio representativo del café.....	94
Tabla 31. Metodología Box - Cox: Costo total promedio por tonelada.....	95
Tabla 32. Estimación modelo VEC	1
Tabla 33. Test de autocorrelación de Portmanteau.	2
Tabla 34. Test de autocorrelación serial.	2
Tabla 35. Test de normalidad conjunta.....	3
Tabla 36. Estimación SARIMA toneladas producidas.	4
Tabla 37. Estimación GARCH precio representativo del café.	7
Tabla 38. Modelo GARCH costo total promedio por hectárea	11

Lista de figuras

Figura 1. Historia de la Tierra.....	17
Figura 2. Sistemas termodinámicos.	21
Figura 3. Relación fundamental entre Capital, Trabajo y flujo de energía disponible.	24
Figura 4. Diagrama de producción conjunta.....	31
Figura 5. Factores que afectan la erosión causada por el agua	37
Figura 6. Distribución de la calificación dada a la erosión para cada variable.....	44
Figura 7. Disposición para invertir y valor asignado para evitar o controlar la erosión... ..	45
Figura 8. Disposición a invertir en mitigar el costo de la erosión (DPI).	48
Figura 9. Test de estabilidad modelo VEC.	58
Figura 10. Producción mensual de café en toneladas	61
Figura 11. Producción mensual de cafe en primeras diferencias.....	62
Figura 12. Hectáreas de tierra cosechadas mensualmente.	64
Figura 13. Hectáreas de tierra cosechadas mensualmente en primeras diferencias.....	65
Figura 14. Precio representativo del café (mensual).....	66
Figura 15. Transformación Box - Cox Precio representativo del café.	66
Figura 16. Precio del café dólar por tonelada, transformación Box - Cox en primeras diferencias.	67
Figura 17. Costo total promedio, dólar por hectárea.	68
Figura 18. Transformación Box - Cox Costo total promedio dólar por hectárea.	68
Figura 19. Costo total dólar por hectárea, transformación Box - Cox en primeras diferencias.	69

Figura 20. Precios y costos del Café en dólares por tonelada.....	76
Figura 21. Calculo del IPP	87
Figura 22. Test de normalidad SARIMA toneladas producidas.	6
Figura 23. Prueba Q de autocorrelación en los residuos SARIMA toneladas producidas. 7	
Figura 24. Prueba Q de autocorrelación en los residuos GARCH precio representativo del café.....	9
Figura 25. Ajuste de los residuos modelo GARCH del precio a la distribución t student	10
Figura 26. Prueba Q de autocorrelación en los residuos: modelo GARCH costo promedio por tonelada.....	12
Figura 27. Grafico Quantile - Quantile, ajuste de los residuos modelo ARCH a una distribución simétrica.....	13

Introducción

Cada vez es más frecuente encontrar economistas que hablan sobre la aplicabilidad de las leyes de la física termodinámica en el análisis económico, lo cual a primera vista pareciera no tener relación alguna, por lo que es necesario considerar el proceso histórico que conllevó a estas consideraciones. Se podría iniciar hablando de los principales acercamientos entre la sostenibilidad ambiental y la ciencia económica; partiendo de la Escuela Clásica; en la que la tierra es el mero espacio en el que tiene lugar la producción, pero que genera renta sobre su capacidad de explotación, dependiendo de las cualidades físicas que la diferencien de otras y de su disponibilidad (Ricardo, 1993), sin embargo a partir del fin de la Segunda Guerra Mundial las apuestas por el crecimiento económico llevaron a considerar los recursos como ilimitados, lo que ocasionó que en los países que no pertenecían a la OCDE se presentaran fuertes impactos ambientales como: cambio climático, destrucción de la masa forestal, contaminación del océano, erosión de la capa de ozono, entre otros, hecho advertido en el Informe de Brundtland (Bermejo Gómez de Segura, 2014) en el que se indicaba que la escases de recursos naturales en los países de la OCDE incentivaba a que los países en vías de desarrollo vieran la sobreexplotación de los mismos como una vía atractiva para el crecimiento. Es así como se propone cambiar de modelo, buscando ya no el crecimiento económico ilimitado sino un desarrollo sostenible, entendido como: “el desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (Bermejo Gómez de Segura, 2014, pág. 16).

Para ello surgen fundamentalmente 2 propuestas: la Economía Ambiental y la Economía Ecológica. La primera es la respuesta de la visión clásica de la economía al Informe de Burtrand y consiste en la valorización monetaria de los recursos naturales (denominado “capital natural”) de tal forma que mediante modelos de crecimiento económico; como el de Solow, se pueda reinvertir la renta obtenida de su explotación y así mantener el stock constante (Escobar, 1995). La segunda es una alternativa transdisciplinar que entiende a la economía como uno de varios subsistemas que juntos componen el ecosistema; en ese sentido el ser humano no debe sobreponerse a las leyes que rigen la naturaleza y por ende la economía debería ajustarse a los servicios ecosistémicos, a las leyes de la física termodinámica, a los límites planetarios, entre otros (Castiblanco R., 2007).

Dentro de los análisis de la economía desde la física termodinámica destacan los de Georgescu-Roegen, quien fue pionero en el tema así como los de su discípulo Herman Daly; quien propone que la economía debería llegar a un estado estacionario donde el consumo no incremente e incluso se reduzca (Daly, 1974) En este caso, es el interés de la investigación relacionar el Principio Extremal de Prigogine al estudio de la sostenibilidad ambiental, aplicándolo a la producción de café en Colombia. Este principio, aunque proviene de la física termodinámica es aplicable a los análisis de cualquier ciencia en general pues incluso Ilya Prigogine (su formulador) considera que la distinción entre ciencias sociales y naturales es errónea, y como parte del estudio del no equilibrio se ajusta de manera muy simple al contexto económico; como lo demostraron Tsirlin y Kazakov (2005).

Dicha relación se plantea mediante una simbiosis entre la teoría de la Economía Ecológica y las herramientas estadísticas propias de la economía, de tal forma que un problema ambiental como lo es la erosión del suelo, se entienda también como un problema que afecta a los sistemas de vida humanos, condiciones evidentes en los diferentes estudios de la erosión del suelo en áreas de cultivo de café en Colombia en los que se demuestra como la pérdida de suelo compromete la productividad y como el manejo integrado de arvenses es la principal herramienta de mitigación; como dicha actividad genera unos costos adicionales, en el corto plazo deja de ser atractiva para los caficultores; es así como se afirma que solo en la medida que este costo sea mínimo los productores se verán incentivados a implementarla garantizando la sostenibilidad de la producción.

Mediante un método deductivo indirecto se puede afirmar que: i) el principio Extremal de Prigogine establece que la entropía llega a su nivel mínimo óptimo cuando un sistema se encuentra en estado estacionario estable, ii) la sostenibilidad se alcanza minimizando la entropía y iii) cuando el costo de mitigar la erosión es mínimo los productores incurren en él; por tanto al definir un sistema de producción (como el del café) como un proceso estocástico (mediante variables que cambian en función del tiempo como los precios, la cantidad producida y los costos) si este cumple con las condiciones de estacionariedad y estabilidad, al aplicar el principio Extremal de Prigogine el nivel de entropía (costo de la erosión) será un mínimo y la producción será sostenible.

Los modelos VAR y VEC son herramientas econométricas que trabajan con sistemas de ecuaciones que deben cumplir con condiciones de estacionariedad y estabilidad, en ese sentido son el medio más adecuado para la comprobación de la hipótesis planteada aunque, también son útiles los test de raíz unitaria Dickey-Fuller; que verifican la estacionariedad de una serie, y la prueba de Chow; que verifica la no existencia de quiebres estructurales (estabilidad).

Emplear la metodología anteriormente mencionada si bien no es de utilidad para los pequeños productores, puede llegar a serlo para los formuladores de política del Estado o de grandes agremiaciones que tengan la capacidad de influir sobre el precio o de crear alternativas que subsidien el costo de la erosión, ya que la no estabilidad o estacionariedad indicaría que por sí mismo el sistema no tiene la capacidad de asumir dichos costos producto de la volatilidad de los precios, o de la cantidad producida, entre otros. Adicionalmente otorga información para otras disciplinas como por ejemplo geólogos, que podrían encontrar que el costo mínimo dispuesto a asumir por parte de los caficultores no es suficiente para mitigar completamente la erosión, lo que implicaría que la sostenibilidad económica difiere de la sostenibilidad ambiental.

En conclusión este trabajo constituiría un insumo para otros estudios que abordarían análisis más allá del objetivo de esta propuesta; delimitación dada por el enfoque transdisciplinar de la Economía Ecológica, siendo esto solo el aporte desde el ámbito económico; como una ligera validación cuantitativa de la aplicabilidad de los conceptos de la física termodinámica al análisis económico.

El presente trabajo se organiza en seis secciones, incluyendo esta introducción, seguida de un marco teórico que sintetiza los principales enfoques de la sostenibilidad ambiental desde la economía, una revisión de literatura previa en la que se exponen trabajos en los que se aplicaron herramientas de la física termodinámica al análisis económico, un marco metodológico en el que se define el sistema y se formulan las hipótesis y los criterios de verificación, la aplicación del modelo, en el que se analizan las condiciones de estacionariedad y estabilidad y se calcula el costo mínimo de la erosión (entropía) y finalmente las conclusiones.

Justificación y planteamiento del problema

En el contexto actual en que se han firmado numerosos compromisos por parte de los países con el fin de alcanzar la “sostenibilidad ambiental” (siendo en algunas ocasiones requisito para la integración económica) el problema de la erosión del suelo cobra cada día mayor importancia.

Desde la ciencia económica se han planteado numerosos enfoques para abordar la sostenibilidad ambiental siendo el más integral el de la Economía Ecológica; uno de los pilares en los que se basa esta disciplina es el análisis de la producción desde los principios de la Física Termodinámica, sin embargo, son pocos los trabajos que profundizan en la aplicación literal de la física al análisis teórico y más escasos aun los que tratan de aplicarlo en casos reales.

Por lo general, los seguidores de la Economía Ecológica ven a la economía como una ciencia blanda, razón por la cual llevar a la práctica los principios de la física termodinámica (que es una ciencia dura) se convierte en un tema complejo. Esto deja de ser un problema gracias a los postulados de los pensadores más recientes como Ilya Prigogine, para quien las ciencias sociales jamás se debieron separar de las ciencias naturales argumentando que no existen leyes deterministas sino leyes probabilísticas.

Adicionalmente, es visible en trabajos como el de Julio Carrizosa Umaña (1996) que en ocasiones los ecologistas han llegado a exigir un radicalismo en temas de sostenibilidad ambiental tan duro que ignoran la capacidad de los productores para

asumir dichas cargas, con lo cual el tema de la degradación de la tierra pasa a un segundo plano.

Es así como surge la necesidad de encontrar un nivel óptimo de costos ambientales (por mitigar la erosión, implementar buenas prácticas agrícolas, etc.) asumible por los productores y que garantice la sostenibilidad frente a posibles variaciones en los precios provocadas por factores externos a la mera producción; todo ello sujeto a principios de la física termodinámica que sean validados mediante herramientas econométricas.

Lo anterior permitiría armonizar planteamientos de la Economía Ecológica con aplicaciones prácticas y el concepto de sostenibilidad ambiental aterrizándolo a lo que los productores estarían dispuestos a asumir dentro de sus costos; brindando herramientas que faciliten las decisiones de los formuladores de política pública.

Objetivos

General:

Proponer una metodología que permita el análisis de la sostenibilidad ambiental, desde un enfoque del costo asumible por los productores, empleando el principio Extremal de Priogogine, validándola mediante herramientas econométricas en una aplicación al caso de la producción de café en Colombia.

Específicos:

- Realizar una revisión de las principales corrientes de la economía que han abordado el tema de la sostenibilidad ambiental
- Examinar algunos trabajos en los que se apliquen herramientas de la física termodinámica en análisis económico
- Revisar antecedentes del estudio de la erosión en la producción de café en Colombia, en los que se detallen las características que presenta este fenómeno, los medios implementados para mitigarlo y los costos de ello.
- Proponer una metodología de análisis en la que mediante la aplicación del Principio Extremal de Prigogine al análisis de un sistema de producción; como el del café en Colombia, se encuentre el nivel mínimo de entropía equivalente al costo mínimo por erosión o pérdida de suelo.
- Validar los supuestos del modelo propuesto mediante herramientas econométricas

- Determinar si la producción del café en Colombia es sostenible con base en los resultados obtenidos.

Capítulo 1

Marco teórico

Hablar de sostenibilidad ambiental desde la economía es un asunto complicado, si bien es un tema de gran relevancia en todas las ciencias y disciplinas, en particular la ciencia económica como la conocemos hoy en día se desligó de este análisis durante una parte significativa de la historia del desarrollo de su pensamiento.

La economía tiene 4 objetos de estudio fundamentales: la producción, la distribución, la circulación y el consumo (Reina, Zuluaga, & Rozo, 2006), donde cada escuela de pensamiento se ha enfocado, o más bien, le ha dado mayor prioridad a alguno de ellos pero ignorando el entorno dentro del cual se desenvuelve el sistema económico: el ecosistema.

Es así como por ejemplo las escuelas de economía que siguen el dogma del laissez faire (clásicos, utilitaristas, monetaristas, entre otros) tienen una concepción plana de la tierra y los recursos naturales; se concibe la tierra solo como el lugar donde ocurre la producción y de la cual se puede obtener una renta según su productividad (Teubal, 2006), y a los recursos como una dotación inicial dada disponible para que cada país la explote con la finalidad de generar riqueza (Smith, 1776); un ejemplo de ello es la versión original de la función de producción Cobb Douglas, en la que la producción depende únicamente del capital y el trabajo, si bien el factor tierra puede ser

perfectamente incluido en dicho modelo, el hecho de no aparecer denotado ocasiona que se subestime su importancia.

Adicionalmente, escuelas que no seguían el *laissez faire* pero que concebían un capitalismo intervenido estatalmente (keynesianos), se enfocaron en la distribución y el consumo (la demanda), pues era esta la que determinaría la producción, ignorando los impactos ambientales que ello implicaría.

Por otro lado las escuelas basadas en una filosofía humanista (socialistas) conciben a los recursos como “los medios de producción” y la apropiación de la naturaleza por parte del ser humano determina los dueños de dichos medios (la propiedad) generando así una diferencia de clases (Bifani, 1999), pero en ningún momento esto podría relacionarse con la idea de preservación de los recursos naturales, pues solo se pretendía explicar la dinámica del capital de manera crítica.

Finalmente es así como solo hasta 1987 en el Informe de Brundtland algunas escuelas económicas empezaron a hablar del tema, si bien existieron autores que se aproximaron (como Veblen, desde el Institucionalismo), dichas escuelas no abordarían el tema de manera detallada hasta 1987.

La respuesta formal más conocida fue dada por parte de los clásicos, esta es la denominada “Economía ambiental”, la cual fue demasiado polémica al asignarle un valor económico a los recursos naturales dando como resultado múltiples críticas y una teoría alternativa desde la interdisciplinariedad: la “Economía Ecológica”

1.1. Economía ambiental

Arturo Escobar (1995) en su artículo “Desarrollo Sostenible: diálogo de discursos” propone como punto de origen de este enfoque el Informe de Brundtland, en el que básicamente se abordaba desde el punto de vista de la modernidad las relaciones sociales, por lo que no puede negar la existencia de una economía (concepciones y prácticas), donde los recursos son limitados y por ende tienen un precio. Es decir que la economía ambiental es una respuesta de la teoría de la utilidad marginal a la problemática de los límites al crecimiento, donde sigue primando la maximización del beneficio; esto es lo que Veblen (2000) denominaba: “hedonismo pecuniario”, pues básicamente, para poder hacer la relación costo beneficio habría que valorar los recursos naturales, si bien Veblen demostró la ineficiencia de la teoría de la utilidad marginal al asignarle valor incluso a los sentimientos y las emociones, la relación en este caso es similar, pues los recursos son parte del ecosistema, el ecosistema es fuente de vida, y ¿Cómo valorar la vida pecuniariamente?.

Aun así, este es el enfoque que se ha aplicado con frecuencia para “garantizar la sustentabilidad del medio ambiente” en los modelos de desarrollo sostenible. Básicamente se trata de asignar un valor al impacto en el medio ambiente, considerándolo una externalidad al proceso de producción, con el fin de internalizar el costo, esto es: “El teorema de Coase”. En Colombia este punto es evidente en el Decreto 2811 de 1974 en el artículo 19, donde dice que el gobierno estimara por sectores de usuarios el costo del daño ambiental generado.

1.2. Economía ecológica

La economía ecológica es una alternativa ecocéntrica, de concebir el sistema económico, para ello parte de la teoría de los sistemas, afirmando que el sistema económico no es más que un subsistema dentro de un gran sistema: el ecosistema, del cual se alimenta, recibe influencia e influye en él. Es un punto de vista transdisciplinar, es decir, no pretende concebir el ecosistema y las interrelaciones entre sus subsistemas desde una sola ciencia, sino que recurre a la ecología, la biología, la física termodinámica y la economía entre otros; así tiene una perspectiva más completa de las implicaciones de las actividades productivas en los medios en que tiene lugar. (Castiblanco, 2007)

De esta forma cuestiona los principios supuestos implícitos en la economía ortodoxa, como lo son, el tiempo lineal y ajeno al proceso productivo, la disponibilidad de los recursos naturales como algo inmutable e infinito, y la independencia del sistema económico de los demás sistemas.

¿Qué propone a cambio? En primer lugar que los ecosistemas no se crean, no son estáticos ni inagotables, pero si se transforman y evolucionan, dichas transformaciones y evoluciones tienen implicaciones en todos los subsistemas, incluido el económico, por lo que el sistema económico debe coevolucionar con el ecosistema. ¿De qué forma debe coevolucionar?, bueno, pues en primer lugar debe reconocer la importancia del ecosistema en todas las actividades económicas (Castiblanco, 2007), como:

- proveedor de recursos para la producción y para el consumo
- fuente de servicios ecosistémicos (Sachs, 1997) estos se clasifican en:

- Servicios de apoyo: Dispersión y reciclaje de nutrientes, dispersión de semillas y producción primaria
 - Servicios de aprovisionamiento: alimentos, agua, minerales, farmacéuticos, bioquímicos y productos industriales y energía
 - Servicios de regulación: captura y almacenamiento de carbono y regulación del clima, descomposición de residuos y desintoxicación, purificación de agua y del aire, polinización de cultivos y control de plagas y enfermedades
 - Servicios culturales: inspiración cultural, intelectual y espiritual, experiencias de recreación y descubrimiento científico
- Vertedero de desechos

En segundo lugar se deben tener en cuenta los principios de la física termodinámica, es decir, que toda transformación de energía conlleva una pérdida de energía utilizable, toda transformación de materia genera desechos, y toda transformación implica un grado de irreversibilidad en la medida en que persista, o lo que es peor aún, que sea un daño irrevocable, es decir, que se pierda en su totalidad la existencia en el tiempo y espacio (Castiblanco, 2007).

Una vez claros los servicios ecosistémicos y las leyes de la termodinámica que rigen los ecosistemas se plantean una serie de alternativas como los límites al crecimiento que pueden ser ecológicos en cuanto a los recursos y su disponibilidad (una aproximación a estos son los denominados “límites planetarios” (Rockstrom, 2010, min. 8:17)), límites sociológicos en cuanto a las diferentes culturas y por ende metas diferentes, límites

sociales en cuanto a la distribución de los recursos y las altas tasas de crecimiento demográfico, límites institucionales en cuanto a la inestabilidad de las mismas y límites económicos en cuanto a la inversión y la ineficiencia, pues en la economía capitalista siempre se pretende incrementar la cantidad producida pues se cree que las necesidades son ilimitadas y que por eso la demanda tiende a infinito, y de esa forma debe crecer la productividad, aunque sea de mala calidad y se aprovechen ineficientemente los recursos, entre otros. (Carrizosa Umaña, 1996)

Tabla 1. Límites ecológicos al crecimiento.

Elementos	Principales Problemas	Reacciones
Energía	No renovable, residuos tóxicos	Energías alternativas
Minerales	Agotamiento	Reciclaje
Aire	Muertes Humanas	Industria limpia
Suelo	Desertificación	
Bosques	Deforestación	
Vida Silvestre	Extinción	
Ecosistemas	Transformación	

Fuente: La Evolución Del Debate Sobre Desarrollo Sostenible – Julio Carrizosa Umaña

Estos límites se traducen en propuestas como no explotar los recursos más allá de la capacidad de regeneración, la extracción de los recursos no renovables debe hacerse simultáneamente a la creación tecnológica de alternativas, las emisiones generadas deben ser iguales a las capacidades de asimilación de los ecosistemas, incrementar la productividad de los recursos, es decir producción eficiente, no producir más sino producir mejor y prevenir al máximo los riesgos (Castiblanco, 2007).

Como ya se mencionó anteriormente, los límites ecológicos han sido abordados de manera global en los límites planetarios, cabe hacer una especificación más detallada de estos, puesto que no se consideran únicamente como límites a la producción o al crecimiento económico, sino a toda la actividad humana en general.

1.2.1. Los límites planetarios.

Los límites planetarios fueron expuestos por la revista *Nature* en el año 2009, al realizar una evaluación de la historia de la tierra, es decir, los cambios que han tenido los ecosistemas que como ya se ha dicho permanecen en constante transformación. En dicha aproximación, se evaluaron temas como la biodiversidad, el clima, los ciclos del carbono, el nitrógeno el metano, entre otros. Así se concluyó que la era moderna consistía en una etapa de equilibrio relativamente estable sobre la cual se escribiría la historia humana, es decir la historia que conocemos y sobre la cual se podría desarrollar el hombre (Rockstrom, 2010, min. 8:17).

Sin embargo a partir de los años 50 con la industrialización las actividades humanas empezaron a tener un mayor impacto sobre los ecosistemas, pues se consumía más energía, se disparó la tasa de crecimiento demográfico, la producción incrementa, las emisiones y en fin todo esto empieza a tener repercusiones en varios aspectos que tenían que ser delimitados para poder establecer los límites en los que se debía mover el proceder humano en el Antropoceno, es decir, en la actualidad, donde las medidas para frenar los impactos debían empezar a ejecutarse y no solo quedar en palabras, donde se podrían revertir los impactos ya generados (Rockstrom, 2010, min. 10:40).

Fue así como se lograron determinar los 9 límites planetarios:

- El cambio climático
- La acidificación de los océanos
- El cambio en los usos del suelo
- Los cambios en el ciclo del fosforo y el nitrógeno

- Degradación de la capa de ozono
- Pérdida de biodiversidad
- La contaminación química
- El consumo de agua y el ciclo hidrológico
- La contaminación del aire.

Historia de la tierra

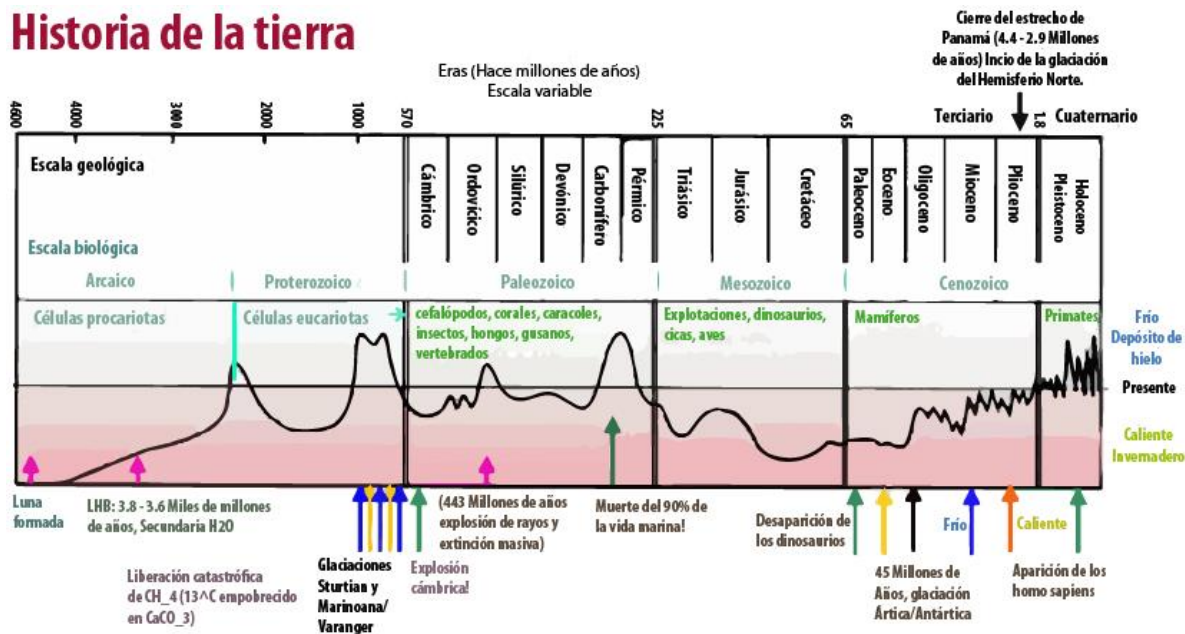


Figura 1. Historia de la Tierra

Tomada y adaptada al español de: <http://zco1999.wordpress.com/2010/01/30/los-nueve-limites-planetarios-del-stockholm-resilience-institute/>

Existen 2 de ellos que no han podido ser medidos todavía y son la contaminación química y la contaminación del aire, y otros tres que ya han sobrepasado el límite como lo son: el cambio climático, los cambios en el ciclo del nitrógeno y fósforo, y la pérdida

de la biodiversidad (se dice que esta es la sexta era de extinción de especies contando la extinción de los dinosaurios).

Pero el propósito de dichos límites no fue alarmar, sino delimitar el proceder de la acción humana frente a la sostenibilidad del medio ambiente, esto nutre a la economía ecológica dentro de los parámetros que determinan las interrelaciones entre los seres humanos y los ecosistemas como si se tratara de las reglas de juego en una sociedad. Si se pretende hacer un cambio tiene que atender a estos 9 límites planetarios, reducir el consumo de energía y de agua, desarrollar e implementar nuevos tipos de cultivo que contrarrestan el CO₂ y consumen menos agua, la limpieza de los ríos etc.

Como se ha visto, la Economía Ecológica es bastante amplia dado su carácter transdisciplinar, de esta manera realizar un estudio que trate de abordar todos los aspectos en que incurre es una tarea bastante compleja. Este trabajo se enfoca únicamente en la afirmación de que la producción debe estar sujeta a las leyes de la física termodinámica; ya se han mencionado anteriormente las correlaciones entre la ecología y la biología con la economía para contextualizar al lector pero ¿de qué manera se relaciona la física termodinámica con la economía?, a continuación se realizara una breve descripción.

1.2.2. La Física Termodinámica en la Economía.

En todo proceso físico o químico se ponen en juego una serie de energías, la ciencia que estudia dichas energías en sus distintas manifestaciones es la Termodinámica (Quimitube.com, 2013, min. 0:01).

Si según Georgescu, la palabra proceso significa “cambio” tanto en el ser como en el devenir, y si dicho cambio no puede concebirse sino como la relación de una cosa con

su otro (por lo que habría que trazar límites analíticos que definan el ser y su otro para poder analizar los cambios); hablar del proceso productivo implicaría trazar un límite analítico (Georgescu-Rogen, 1996), en el que todos los cambios físicos o químicos implicarían intercambios entre lo que se encuentra dentro del límite de lo que hace parte del proceso productivo, y lo que está afuera, es decir su entorno. De esta forma se concluye que el proceso productivo, al implicar cambios físicos y químicos, puede ser estudiado desde la termodinámica.

Es importante el estudio del proceso productivo desde la termodinámica, para tener una definición completa, ya que este obedece a dos leyes fundamentales: 1) la ley de conservación de la masa y 2) la ley de conservación de la energía. Esta segunda ley es también el primer principio de la termodinámica, y en su definición más simple significa que la energía no se crea ni se destruye, únicamente se transfiere, por lo que todo proceso productivo implica una variación de energía entre los reactivos (factores productivos) y los productos que generalmente se denota como: “ ΔE ”.

Dentro de un espacio arbitrario delimitado para su estudio (llamado “Volumen de Control”) se puede definir la ley de conservación de la masa como:

“la transferencia neta de masa hacia o desde el volumen de control durante un intervalo de tiempo Δt es igual al cambio neto (incremento o disminución) en la masa total dentro del volumen de control durante Δt . Es decir,

$$\left(\begin{array}{c} \text{Masa total que entra} \\ \text{al VC durante } \Delta t \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Masa total que sale} \\ \text{del VC durante } \Delta t \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cambio neto de masa} \\ \text{dentro del VC durante } \Delta t \end{array} \right)$$

O bien,

$$m_{entrada} - m_{salida} = \Delta m_{VC} \quad (1)$$

Donde $\Delta m_{VC} = \Delta m_{final} - \Delta m_{inicial}$ es el cambio en la masa del volumen de control durante el proceso” (Çengel & Boles, 2012, pág. 222).

De igual forma el principio de conservación de la energía se puede escribir como:

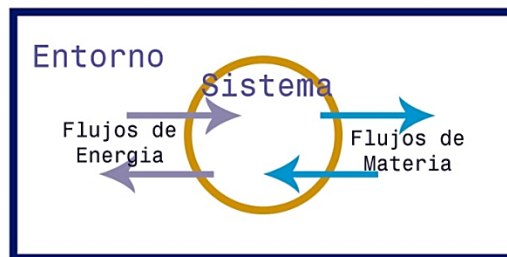
$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema} \quad (2)$$

Donde $E_{entrada} - E_{salida}$ es la transferencia neta de energía por calor, trabajo y masa y $\Delta E_{sistema}$ es el cambio en la energía interna (cinética, potencial, etc.) (Çengel & Boles, 2012).

Dichas variaciones de energía se pueden presentar en muchos sentidos, como por ejemplo en energía luminosa ($h\nu$), energía eléctrica (E_e), energía en forma de trabajo mecánico (w) y energía en forma de un flujo o transferencia de calor (Q). Las transferencias de energía (mencionadas anteriormente como intercambios), se dan entre lo que se encuentra dentro del límite analítico y lo que está afuera, se llamara al primero “sistema” y al segundo “entorno”; ya que el entorno comprende absolutamente todo lo que no hace parte del sistema, la unión de los dos se conocerá como el universo.

Ahora bien, en la termodinámica se clasifican los sistemas según su capacidad para transferir materia y energía de la forma que se muestra en la gráfica 1. Los sistemas abiertos se caracterizan porque permiten la entrada y salida tanto de materia como de energía, un ejemplo de ello puede ser la combustión de gasolina en un motor de un carro, la gasolina se encuentra en estado líquido, pero se le transfiere energía en forma de calor, la cual genera una reacción química en la que combustiona, generando a su vez energía en forma de trabajo mecánico y saliendo al entorno como un gas.

Los sistemas cerrados por otro lado, no permiten la transferencia de masa, pero sí de energía, el ejemplo más comúnmente utilizado es el de calentar una botella cerrada con leche en su interior en un microondas, al retirarla esta desprenderá calor al entorno, pero por estar cerrada no permitirá el escape de vapor y no se intercambiara materia. (Quimitube.com, 2013, min 11:16).



Sistema Abierto



Sistema Cerrado



Sistema Aislado

Figura 2. Sistemas termodinámicos.
Fuente: Elaboración propia.

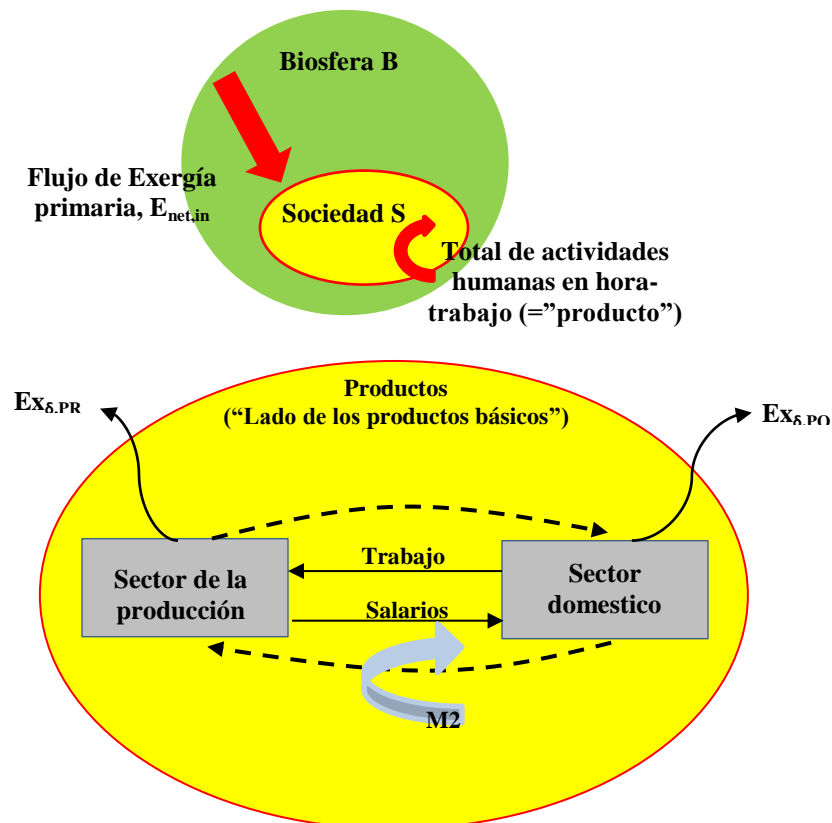
Finalmente el sistema aislado es aquel que no permite intercambios ni de materia ni de energía con el entorno, se puede asimilar con un termo, que en teoría no permite que se desprenda la energía en forma de calor ni que se escape el contenido en su interior.

Pero entonces ¿Qué tipo de sistema es el sistema económico?, para saberlo habría que definir el sistema económico y trazar el límite analítico, bueno, la verdad es que esto ya se ha hecho y además se han presentado múltiples debates en la literatura sobre lo que es o no objeto de estudio de la ciencia económica, por esa razón sería inútil y ocioso tratar de dar una nueva definición, por lo que se partirá de la definición más sencilla, comúnmente aceptada y enseñada en las aulas; en ese sentido nos remitiremos a una cartilla pedagógica, en este caso la guía escolar sobre economía del Banco de la República titulada “El sistema económico” del año 2006, escrita por Mauricio Reina, Sandra Zuluaga y Marcela Rozo, en ella se define la economía como “una ciencia social que se ocupa principalmente del estudio de la producción, la distribución, la circulación y el consumo de bienes y servicios en una sociedad” (Reina, Zuluaga, & Rozo, 2006, pág. 7).

Ahora bien, de estos cuatro puntos expuestos en esta definición, ¿cuál es el objeto en sí mismo?, pues la cartilla también lo explica diciendo que el objeto del sistema económico es la producción de bienes y servicios que se destinan al consumo, y dicho consumo tiene la función de “satisfacer las necesidades humanas”, ahora como se parte del supuesto de que los bienes son escasos y las “necesidades” ilimitadas, entonces hay que ver en qué forma se distribuyen.

En ese orden de ideas, si se habla del sistema económico, y este tiene como objetivo fundamental la producción, entonces el intercambio de energía y/o materia (si los hay) entre el sistema y el entorno debe darse a través del proceso productivo. Como proceso significa “cambio”, de unos reactivos (inputs) a unos productos (outputs), habría que ver que es lo que representa cada uno de ellos en el proceso de producción del sistema económico.

Anteriormente ya se habían asociado los reactivos con los factores productivos es decir: tierra, trabajo, capital y un cuarto factor cuya definición es ambigua en la medida en que unos se refieren a él como iniciativa empresarial, otros como tecnología o “saber hacer”, pero que en definitiva va asociado con la forma, el modo o el método en que se hacen las cosas.



Compras
(“Lado Monetario”)

Figura 3. Relación fundamental entre Capital, Trabajo y flujo de energía disponible.

Fuente: Adaptado al español de: (Sciubba, 2013, pág. 133)

Pero entonces ¿cómo diferenciar lo que hace parte o no del sistema económico si dichos factores en sí mismos continúan siendo bastante amplios?, pues para concretarlo hay que tener en cuenta una serie de parámetros:

En primer lugar recordar que la economía es una ciencia social en otras palabras estudia a la sociedad y al hombre, en segundo lugar que el hombre es una especie más en el universo, en tercer lugar que todas las especies habitan en ecosistemas, y en cuarto lugar que el proceso como cambio es algo que se da en el tiempo.

Ordenando todas estas ideas, una sociedad como una agrupación de seres humanos se asienta en un ecosistema y se organiza socialmente, lo cual incluye el establecimiento de un sistema económico en ese momento del tiempo “ t_0 ” el sistema económico tiene un tamaño determinado por la cantidad necesaria de lo que está en su ENTORNO para producir bienes y servicios, y esto se SUPONE obedece a las necesidades de las personas que conforman dicha sociedad. Sin embargo en el tiempo el número de personas crece, y van surgiendo nuevas necesidades, así la cantidad de bienes producidos también deberá incrementar y por ende los recursos o “factores productivos” necesarios para hacerlo.

De esta forma el lector se podrá dar una idea de qué tipo de sistema termodinámico es un sistema económico, pero para aclararlo completamente hay que definir cada factor productivo; en primer lugar la tierra en el sentido tradicional hace

referencia a todos los recursos naturales, el trabajo es la actividad humana y el capital son las herramientas máquinas y bienes secundarios.

En conclusión, como uno de los factores productivos no hace parte del sistema (la tierra), la entrada de dichos recursos naturales (materia y energía) al sistema a través del proceso productivo y la salida de desechos al ecosistema indican que el sistema económico es un sistema abierto.

Ahora bien, esta no es la única forma de analizarlo, Kenneth Boulding (1981) propone algo totalmente diferente desde la “Bioeconomía”. Para él, la clasificación de los factores productivos en tierra, trabajo y capital es un error atroz, pues solo existiría un factor de producción denominado “know how”, dicho conocimiento es el que permitiría las transformaciones biológicas (como la evolución desde un punto de vista darwiniano) siendo la producción una mera transformación biológica de la materia. A pesar de que su enfoque es determinista y la termodinámica moderna probabilística, su trabajo contiene implícitamente el análisis del universo desde un enfoque termodinámico ya que la afirmación de que los componentes del universo se rigen bajo el principio demográfico (es decir que el crecimiento está dado por las adiciones y el decrecimiento sustracciones (Boulding, 1981)) se puede simplificar matemáticamente en la ecuación de conservación de la masa o la energía (ecuaciones 1 – 2 de esta sección).

El punto anterior implica que cada sistema dentro del universo se rige bajo el principio demográfico, el cual a su vez solamente es una representación de los flujos de materia y energía con el entorno, con lo cual se infiere que bajo el análisis de Boulding, la economía es un sistema abierto.

Una vez definido el tipo de sistema económico se puede entrar a realizar un análisis de como este se ve afectado por las leyes de la física termodinámica. Los economistas que han tratado el tema se han enfocado fundamentalmente en la segunda ley (ley de la entropía) porque permite determinar la relación entre el proceso productivo y la generación de desechos, lo que incluso llevo a Georgescu Rogen a plantear una “cuarta ley”

1.2.2.1. La segunda Ley.

En el apartado anterior se mencionó la primera ley de la termodinámica (conservación de la energía) afirmando que el proceso productivo estaba sujeto a ella, sin embargo los principales autores como Georgescu Rogen, Herman Daly, entre otros, se han enfocado en el análisis de la segunda ley de la termodinámica (ley de la entropía) en el proceso productivo.

La palabra entropía hace referencia a una medida del desorden (Real Academia Española, 2014), esta ley afirma básicamente que en el proceso al ocurrir una transformación de por ejemplo la exergía (energía disponible) en energía en forma de trabajo, hay una parte de ella que se disipa o se pierde, en el sentido que no puede volver a utilizarse dado que se encuentra en un estado de agregación muy desordenado.

Georgescu relaciona el proceso productivo con la segunda ley de la termodinámica partiendo de una de las definiciones formales: “la entropía del universo tiende a incrementarse”. Dicha afirmación implica que todos los elementos del universo sin necesidad de ser transformados en el proceso productivo tienen un nivel de desorden denominado “baja entropía”, cuando dichos elementos entran como un flujo de materias

primas al proceso productivo se requiere de un desgaste energético para transformarlos e incluso su estado de agregación cambia por lo que se incrementa el nivel de desorden y se llega a un nivel de “alta entropía”. (Georgescu-Rogen, 1996).

Una de las propuestas más reconocidas frente a este problema fue formulada precisamente por su principal discípulo Herman Daly (1974), esta se trata de llevar el sistema económico a un estado estacionario el cual consiste en mejorar la calidad de vida de las personas para que la población sea más longeva y haya menores tasas de natalidad y mortalidad, manteniéndola así en niveles constantes y de incrementar la calidad de los artículos producidos (que representan la riqueza) para que de esta forma sean más duraderos y todo esto se traduzca en un incremento de la eficiencia (vista como un mayor rendimiento por el servicio prestado), manteniéndola así mismo en niveles constantes y reduciendo la generación de alta entropía a partir de baja entropía (Daly, 1974).

1.2.2.2. La cuarta Ley.

Uno de los temas más polémicos al relacionar la economía con la física termodinámica fue la formulación de una supuesta “cuarta ley” por parte de Georgescu-Rogen, (Ayres, 1999), hecho que ha sido cuestionado fuertemente tanto por economistas como por físicos.

Esta ley surge cuando se aborda el problema de crear “baja entropía” a partir de “alta entropía”, es decir la transformación de materia en un estado desordenado a un estado ordenado mediante el proceso productivo, esto es básicamente el reciclaje, Georgescu afirma que tal cosa no es posible porque no se tiene en cuenta el desgaste energético que ello implica y que por ende se incurriría igualmente en generación de

entropía de manera exógena (Georgescu-Rogen, 1996), en ese sentido se llega a la conclusión de que nunca se puede reciclar eficientemente el 100% de los materiales pues ello siempre implicara nuevas pérdidas de energía y de materia (esta es la formulación de la “cuarta ley”).

Lo anterior es cuestionado por Robert Ayres, quien afirma que Georgescu tomo la tierra como un sistema cerrado sin tener en cuenta los flujos de exergía desde el espacio como por ejemplo la energía solar, que intervienen en la transformación de dicha materia en estado desordenado a uno ordenado de forma natural. De esta forma las perdidas entrópicas que generaba el proceso de reciclaje regresarían a un estado de “baja entropía” de forma natural haciendo posible el reciclaje del 100% de la materia, siempre y cuando se considerara el tamaño de un “cubo de basura” (en un sentido abstracto) en el que se almacenarían esas materias y energías desordenadas generadas de manera exógena durante el reciclaje, el cual depende de la cantidad de materia que ingresa al proceso productivo, la cantidad de entropía reciclada y la entropía generada de manera exógena, así como de la exergía necesaria para convertir dicha “alta entropía” en “baja entropía” y la exergía disponible en el universo que ingresa a la tierra. (Ayres, 1999)

Capítulo 2

Revisión de literatura previa

2.1. El análisis termo económico

Se ha hablado en puntos anteriores sobre la relación entre el sistema económico y la física termodinámica en el sentido de que el proceso productivo es en esencia un proceso de transformación de materia y energía, sin embargo la aplicación de las leyes de la termodinámica en ciencias económicas se ha extendido a diferentes tipos de análisis que tienen que ver con el proceso productivo y en algunos casos no necesariamente con la generación de desechos, aunque este sea el punto fundamental desde la Economía Ecológica.

En ese sentido se podría afirmar que la combinación de los principios de la economía y de la física termodinámica tienen como objetivo optimizar un sistema reduciendo los costos de la pérdida de exergía durante los flujos de la misma (Ranjan & Kaushik, 2013)(teniendo en cuenta que esta no puede ser recuperada), lo cual se reflejaría en los costos totales del sistema y del producto final en cuestión.

A continuación se presentaran algunas aplicaciones de la física termodinámica que se han realizado en el análisis económico, como lo son: el análisis de una función de demanda como un proceso térmico, la producción conjunta y finalmente el análisis de los sistemas microeconómicos abiertos; este último es de especial atención pues de él deriva en gran parte la metodología a implementar en este trabajo.

2.1.1. Función de demanda como proceso termodinámico.

Una de las aplicaciones prácticas de la termodinámica en la ciencia económica se da en los modelos de Cantidad Económica de Pedido (EOQ), en los que se pretende controlar los inventarios de una empresa. M.Y. Jaber asimilo en 2004 un sistema de producción a un sistema termodinámico, en el que las variables que definen un sistema físico (la presión, el volumen, la temperatura y la composición química) se comportan de forma similar a las variables que definen un sistema productivo (Jaber, Bonney, & Moualek, 2009).

En dicho análisis el sistema económico se aborda desde el punto de vista del comercio, en el que los flujos entre el sistema y el entorno hacen referencia a las ventas, (de manera similar a los flujos de calor en un sistema termodinámico). De igual forma, como en un sistema termodinámico una parte de los flujos de energía se transforma en trabajo mientras que la otra se “pierde” o se disipa, en los flujos de ventas, una parte del inventario se convierte en ingresos mientras que otra se pierde y se convierten en costos ocultos (entropía) (Jaber, Bonney, & Moualek, 2009).

Adicional a ello, se parte del supuesto de que los productos son homogéneos (como los commodities, en este caso el café) pero una empresa (o un país) puede ofrecerlo a un precio más bajo, o también, de que una empresa ofrece un producto de mejor calidad pero mantiene el precio del mercado. Esto con el fin de que si una empresa trata de mejorar su participación en el mercado esto sea a través de los niveles de satisfacción del cliente lo cual afectaría los flujos de ventas.

2.1.2. La producción conjunta.

El concepto de producción conjunta surge de la integración de la economía con otras ciencias (específicamente ciencias naturales) mediante la física termodinámica. Como ya se ha demostrado anteriormente, el sistema económico es un sistema abierto y el proceso de producción implica cambios físicos tanto de materia o energía (factores productivos), en ese sentido la producción es conjunta ya que los inputs de materia o energía en el proceso productivo implican más de un output (los desechos y/o la entropía) (Baumgartner, Dyckhoff, Faber, Proops, & Schiller, 2001).

La producción conjunta no solo hace referencia a la generación de varios outputs durante el proceso, ya que también puede referirse a la implementación de varios inputs, de tal forma que este concepto se aplica tanto a los sistemas naturales como a los económicos facilitando el análisis desde la economía ecológica.

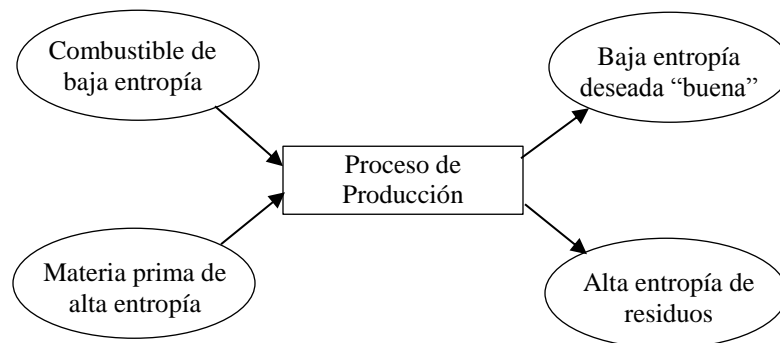


Figura 4. Diagrama de producción conjunta.

Fuente: Adaptado al español de: (Baumgartner, Dyckhoff, Faber, Proops, & Schiller, 2001, pág. 366)

Este concepto se fundamenta en 4 temas centrales, el primero es la irreversibilidad, en la medida en que la producción implica transformaciones que generan entropía y por tanto son irreversibles, el segundo son los límites a la sustitución, que

hacen referencia a que la transformación de insumos requieren cuando mínimo un nivel de baja entropía, el tercero es la inevitable generación de residuos (alta entropía) en el proceso productivo y el cuarto es que los tres primeros en su conjunto indican la necesidad de imponer límites al crecimiento económico (Baumgartner, Dyckhoff, Faber, Proops, & Schiller, 2001).

Dentro de las principales conclusiones del análisis económico ecológico de la producción conjunta se destacan: i) la producción de bienes genera contaminantes y como la capacidad de asimilación de residuos del medio ambiente es limitada, no es posible un crecimiento en estado estacionario, ii) como diferentes productos son generados conjuntamente, la asignación de sus costos es arbitraria, iii) aunque la economía ha tratado de encontrar puntos óptimos para la producción conjunta, estos generan externalidades negativas para la población en términos ecológicos.

2.1.3. Sistemas microeconómicos abiertos.

Tsirlin y Kazakov relacionan los sistemas microeconómicos con sistemas termodinámicos partiendo del supuesto de que tienen estructuras similares; ambos son macrosistemas que se subdividen en microsubsistemas, sin embargo estos últimos no son controlables ni observables por lo que el control y la observación solo es posible a nivel macro. (Tsirlin & Kazakov, 2005) Esto con la finalidad de determinar la tasa de disipación de capital y aplicar el Principio Extremal de Prigogine a los sistemas económicos.

En este trabajo, se podría interpretar al macrosistema como todo el sector productivo del café colombiano y a los microsubsistemas como los productores vistos de

forma individual, estos últimos no son observables porque cada uno de ellos produciría y vendería según sus propios juicios de valor, de esta forma el análisis del Principio Extremal de Prigogine en la producción de café también se encauza a un nivel macro.

Al igual que un sistema termodinámico, un sistema micro económico es descrito por sus variables extensivas e intensivas, las primeras cambian proporcionalmente cuando el sistema se subdivide, tales como: la energía, la entropía y los recursos y las estimaciones de capital, mientras que las variables intensivas no cambian cuando el sistema se subdivide. Los cambios en las variables extensivas son provocados por los flujos de energía, recursos, capital, cuando dichos flujos son causados por factores externos (como en el precio representativo del café, que se ve afectado por la tasa de cambio, el precio en otros países, las negociaciones en bolsa, etc.) los autores los denominan “flujos convectivos”, mientras que si dichos flujos son provocados en la interacción con otro macrosistema (como la producción de otro bien distinto al café) se denominan “flujos difusivos”. (Tsirlin & Kazakov, 2005, págs. 735-736)

Cuando un macrosistema abierto (como el de la producción de café) interactúa con el entorno, en el que hay otros sistemas con capacidad infinita (depósitos, los valores de las variables intensivas son fijos y no dependen de los flujos de intercambio, en este trabajo pueden referirse a los pisos térmicos, el clima y la precipitación del agua) y algunos de sus flujos son convectivos, entonces su estado de no equilibrio puede ser estacionario y en ese caso la entropía generada (costos ocultos de la producción de café, como lo es el costo de la erosión del suelo) puede ser un mínimo óptimo.

2.2. Crítica a la termo – economía

A pesar de las afirmaciones de la Economía Ecológica de la importancia de limitar el crecimiento económico y someter el proceso productivo a las leyes de la Termodinámica, existen posturas contrarias que cuestionan la relevancia y la influencia real de la termodinámica en el desarrollo económico.

Tomas Kaberger y Bengt Mansson realizan un profundo análisis de este tema, llegando a la conclusión de que si bien, la entropía generada por los seres humanos no afecta el desarrollo económico, no es justo que las generaciones futuras dispongan de una cantidad inferior de recursos a la que se dispone actualmente; dándole así una leve importancia al análisis termodinámico. (Kaberger & Mansson, 2001)

Los autores inician destacando el aporte de Georgescu – Rogen, en el que si bien se cambió la forma en que se concibe la producción indicando que esto en esencia es un proceso físico; se cometen básicamente dos errores conceptuales. El primer error identificado, es el ya señalado previamente por Ayres con respecto a una “cuarta ley” de la física termodinámica, al tratar de diferenciar la entropía de la masa de la entropía de la energía, diferencia que en realidad no existe pues la entropía es generada en ambos casos por radiación electromagnética, aunque dicha distinción es realizada en ocasiones en los tratados de física, esto solo tiene un propósito conceptual y tratar de realizar análisis partiendo de dicha diferencia puede llevar a afirmaciones incorrectas (Kaberger & Mansson, 2001).

El segundo error consistió en la desestimación de la mecánica estadística para el análisis termodinámico pues prefería conservar un enfoque determinista, sin embargo

existen fenómenos de la termodinámica que solo pueden ser analizados desde la mecánica estadística siempre y cuando esta se fundamente en teoría matemática (Kaberger & Mansson, 2001).

Posteriormente se señala que la entropía solo es medible en un macrosistema, razón por la cual la entropía de cada uno de los subsistemas que lo componen puede ser mayor o menor a la global, sin embargo estas se compensan unas a otras mediante procesos naturales. Esto es precisamente lo que hace que la alta entropía de la tierra sea convertida en baja entropía mediante la exergia del sol "mitigando" en cierta forma la entropía generada por el ser humano y el proceso económico.

Lo anterior tiene ciertas limitaciones dado que ni el sol ni la tierra son completamente un cuerpo negro, razón por la cual no se puede llegar a un equilibrio termodinámico en el que la entropía sea cero, entre otras cosas porque ninguno emite la radiación necesaria y porque la tierra tiene una capacidad limitada de exportación de entropía.

Este último punto afecta los procesos físicos (como la producción industrial) en la medida en que la transformación de recursos naturales no puede ser compensada de la misma forma que se compensan los stocks de capital en los modelos macroeconómicos cuando estos se disipan, para ello se requerirían cantidades mayores de negantropía, lo cual no se puede determinar debido al desconocimiento fiable del tamaño de la población y la tasa de disipación.

Finalmente se demuestra el potencial exergético del sol para reducir la entropía de la tierra, sin embargo se encuentran ciertas problemáticas para que ello suceda, en primer

lugar la entropía generada es 15 mil veces mayor, por lo cual no solo bastaría con aprovechar la energía solar disponible, sino que habría que reducir los niveles de entropía generados, en este punto entra la segunda complicación pues la entropía generada naturalmente es 7,500 veces más que la entropía generada por la actividad humana, y el tercer punto es que no existen espacios lo suficientemente amplios como para el aprovechamiento de la energía solar.

Aun así, dichas problemáticas pueden ser afrontadas mediante nuevas tecnologías que permitan aprovechar la energía solar en mayor proporción revolucionando la industria y permitiendo el empleo de una mayor *baja entropía* que garantice la conservación de los recursos naturales para las generaciones futuras.

2.3. Estudio de la erosión en suelo cafetero de Colombia

Según la Real Academia Española (2001), el termino erosión hace referencia al desgaste de la superficie terrestre por agentes externos, como el agua o el viento; es concretamente el arrastre y desprendimiento de las partículas del suelo de forma apresurada (Suearez de Castro, 1979). Es posible hablar de varios tipos: erosión hídrica; como la generada por el fenómeno de las cárcavas, un exceso de precipitación, etc., erosión por el viento; que por lo general ocurre solamente en suelo desnudo, erosión por degradación física y química, por tipos de explotación agrícola inadecuados o usos contrarios a la vocación del suelo, entre otros; aunque por lo general solo se hace referencia a la erosión hídrica y eólica.

Omitiendo la erosión por viento (ya que esta por lo general solo tiene lugar en terrenos planos, con escasa lluvia y vegetación; desiertos), el fenómeno de la remoción de

masa de suelo requeriría de agua para poder presentarse y la única fuente de la que podría provenir es de la lluvia (Suearez de Castro, 1979). Como el suelo tiene una capacidad de absorción, cuando las lluvias son intensas y se supera dicha capacidad se forma una capa de agua cuyo volumen depende de varios factores físicos como la intensidad del aguacero, la frecuencia e incluso la pendiente del suelo; a esto se le conoce como esorrentía.

Esta capa de agua fluye sobre la tierra arrastrando consigo sustancias minerales y partículas de suelo, generando en ocasiones cortes sobre la tierra y erosión.



Figura 5. Factores que afectan la erosión causada por el agua

Fuente: (Suearez de Castro, 1979)

Dado que existe un ciclo hidrológico, es natural que se presenten estos fenómenos y que su impacto en la pérdida de suelo sea inferior en caso de no existir intervención humana porque el ecosistema se auto organiza y presenta ciertas resistencias pero, ante dicha intervención, la tala y pérdida de vegetación con fines productivos pueden afectar dichas resistencias incrementando el impacto de las lluvias y así mismo la erosión.

Esto no quiere decir que los niveles de erosión sin intervención humana sean en sí mismo bajos, ello depende de la intensidad de la lluvia, la escorrentía y la pendiente del terreno. Cuando las lluvias son muy fuertes, su impacto en el suelo contribuye en mayor medida al desprendimiento de partículas de suelo en comparación con leves lloviznas aunque la frecuencia de la lluvia sea la misma. Fernando Suarez de Castro ejemplifica esto con datos de Chinchiná Colombia:

Tabla 2. Intensidad de lluvias y pérdidas de suelo. Chinchiná, Colombia.

Cantidad de lluvia milímetros	Intensidad máxima en 5 minutos milímetros	Escorrentía milímetros	Erosión toneladas por hectárea
20,6	7,9	6,8	7,35
21,4	5,0	11,1	1,74
18,0	4,5	7,8	1,06
21,8	2,2	4,5	0,47
20,0	1,9	0,8	0,12
22,0	1,0	?	0,06

Fuente: (Suearez de Castro, 1979)

El autor afirma que aguaceros similares causan mayores pérdidas hasta en cien veces cuando la lluvia tiene una intensidad de 7,9 mm y una precipitación de 20,6 mm que cuando la lluvia tiene una menor intensidad (1 mm) y una mayor precipitación (22 mm), por cada 5 minutos.

En el caso de la escorrentía, esta va relacionada con la duración del aguacero; la infiltración del agua en el suelo toma un tiempo determinado a partir del cual según las condiciones de humedad, intensidad y precipitación se forma la capa de agua con un volumen estable y a medida que se prolonga su duración mayor va siendo la pérdida de suelo (Suearez de Castro, 1979).

Finalmente se tiene la pendiente del suelo; este es un factor determinante ya que la erosión por agua no suele presentarse en terrenos planos, pero como la zona cafetera de Colombia en su mayoría se encuentra en las cordilleras y zonas montañosas con altas pendientes es necesario mencionarla.

Cuando la escorrentía arrastra partículas de suelo, la cantidad de las mismas también depende de la velocidad con que esta fluya, por consiguiente a una mayor inclinación, mayor debe ser la velocidad y las partículas de suelo arrastradas, es decir una mayor erosión.

“El 40% del territorio colombiano presenta erosión de muy ligera a muy severa y la zona Andina, donde se encuentra la zona Cafetera Colombiana, es la más afectada con un 88% de erosión” (Rivera Posada, 2005, pág. 3), también destacan los movimientos masales, que aunque no se considera como “erosión”, es un problema que afecta las zonas cafeteras (Salazar G. & Hincapié G., 2006). Estos fenómenos pueden ser causados por factores naturales o antrópicos, los primeros son: la susceptibilidad del material de origen o roca, susceptibilidad del suelo, características de la pendiente (grado y longitud) lo que favorece la acción de la gravedad, el clima y los movimientos telúricos y fallas geológicas; mientras que los segundos son: la deforestación, las oracticas agrícolas

inadecuadas, la intervención de las laderas (cortes o excavaciones), el manejo inadecuado de aguas y la intervención de drenajes naturales, entre otros (Salazar G. & Hincapié G., 2006).

La erosión es un problema fundamental en la actividad agrícola pues afecta directamente la productividad del suelo, en Colombia son múltiples los estudios que se han realizado por parte del Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) y la Federación Nacional de Cafeteros, pero entre ellos se identifican 3 objetivos centrales: la medición, el manejo y el costo.

Para la medición se han tratado de aplicar la “Ecuación Universal de Pérdida de Suelo” (USLE) formulada por Wischmeier y Smith así como su versión mejorada, denominada la “Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada” (RUSLE). La primera involucra los factores activos, pasivos y atemperantes, causantes de erosión, sin embargo está presenta dificultades para su cálculo ya que no se dispone de toda la información, en ese sentido la segunda incorpora al análisis los procesos que influyen en la erosión y les da un mayor peso que a las variables evaluadas (Wischmeier & Smith, 1978).

“Para Colombia, la Federación Nacional de Cafeteros ha venido trabajando en la determinación de los factores: R, índice de erosividad de las lluvias, mediante el uso de los índices de erosión pluvial de Fournier y de Hudson; K, susceptibilidad del suelo a la erosión, a través de índices de erodabilidad; L, longitud de la pendiente; S, grado de la pendiente; C, uso en cultivo; y P, prácticas de conservación de suelos, en parcelas de escorrentía diseñadas para estudiar y evaluar el comportamiento de estos parámetros en la Zona Cafetera Central Colombiana, en suelos de ladera (Melanudands), bajo diversos

sistemas de producción de café y de otros cultivos” (Rivera-Posada, Lal, Amézquita-Collazos, Mesa-Sánchez, & Chaves-Córdoba, 2010, pág. 345)

Uno de los estudios más detallados ha sido el de Rivera-Posada, Lal, Amézquita-Collazos, Mesa-Sánchez, y Chaves-Córdoba en el que se realizaron cálculos de la USLE, la RUSLE y un tercer índice denominado WEPP (proyecto de predicción de erosión por el agua) para los laderos de la zona cafetera colombiana; cinco suelos de la Zona Cafetera Colombiana, tres derivados de cenizas volcánicas Chinchiná, Montenegro y Fresno, y dos derivados de basaltos y areniscas olivínicas, Parnaso y Guamal. Los resultados han indicado que existe una fuerte relación entre la densidad aparente (D_a) de los suelos y la erodabilidad, dicha relación es directamente proporcional, es decir que a mayor densidad aparente, mayor será el valor de la erodabilidad de los suelos, y así mismo su susceptibilidad a la erosión. Los autores concluyen que se debe dar un uso más adecuado a los suelos evitando el paso de maquinaria pesada sobre tierra agrícola, dando un mejor uso a la ganadería y los herbicidas entre otras buenas prácticas agrícolas.

En el caso del manejo de la erosión, los estudios han indicado que dentro de las principales actividades que se deben implementar para reducir la erosión se encuentra el renuevo del cultivo de café después de 5 años (cuando este reduce en gran manera su productividad), así como el manejo integrado de arvenses (MIA); el cual consiste en “la combinación oportuna y adecuada de diferentes prácticas de cultivo, como los son los manejos mecánico, químico, natural, cultural y biológico, con el fin de reducir la interferencia de las arvenses a niveles que no afecten el rendimiento de los cultivos” (Hincapié Gómez & Salazar Gutiérrez, 2007, pág. 1). En 2007, Quiroz-Martin e

Hincapié-Gómez realizaron un estudio en la Estación Central Naranjal de Cenicafé, ubicada a 4° 59' Latitud Norte, 75° 39' Longitud Oeste y una altitud de 1.400m en el que demostraron que al emplear cultivos mixtos de café y frijol, o café y maíz, o de café y yuca, existían diferencias estadísticamente significativas en los niveles de pérdida del suelo entre el empleo o no del MIA, siendo inferior el nivel de erosión cuando sí se emplean (Quiroz e Hincapié, 2007).

Lo anterior es una verdad comúnmente aceptada incluso desde 1949; José Horacio Rivera Posada en su escrito “Causas y consecuencias de la erosión de suelos de ladera colombiana” presenta una serie de tablas en las que se evalúan las pérdidas de suelo en cultivos de café entre 1949 y 1950 empleando el método tradicional y el Manejo Integrado de Arvenses. Los resultados son abismales, por ejemplo, desyerbando con azadón y machete de la forma tradicional, se pierden hasta más de 500 toneladas de tierra por hectárea en comparación del manejo de arvenses.

Tabla 3. Suelo perdido por erosión en terrenos desyerbados con azadón y con machete, en suelos Dystropepts. Cenicafé (1949 - 1950) (Suárez de Castro, 1951).

Tratamientos	Suelo perdido t/ha. año		
	1949	1950	Promedio
Terreno desyerbado con azadón cada tres meses.	327,66	531,49	429,57
Terreno desyerbado con machete (cortando arvenses 3 a 5 cm de altura del nivel suelo) cada tres meses.	1,31	1,60	1,45
Cafetal joven desyerbado con azadón cada cuatro meses.	24,75	4,58	14,67
Cafetal joven, con cobertura de añil rastrero desyerbado con machete (cortando arvenses 3 a 5 cm de altura del nivel del suelo), cada cuatro meses.	0,89	0,34	0,61

Fuente: (Rivera Posada, 2005, pág. 5)

Finalmente en cuanto a los costos, se podría hablar de 2 tipos de costo: el costo real de los procesos que ayudan a reducir o mitigar la erosión y el costo en que incurren realmente los productores de café; con respecto a ello César Alberto Serna-Giraldo (2009) realizó un estudio estadístico en los departamentos de Caldas, Quindío y Risaralda para determinar la disposición a invertir en el manejo y control de la erosión por parte de los productores de café.

El estudio hace inicialmente una descripción socioeconómica de la muestra, posteriormente evalúa el conocimiento de los caficultores con respecto a la erosión donde el 94.3% afirmó saber que es pero de estos solo el 79% dio una definición correcta. En dicho estudio se encuentra que a pesar de que se tiene conocimiento sobre la erosión son solo un poco más del 75% son los que emplean el MIA para mitigarla, esta información

es confrontada con la percepción de la gravedad, la intensidad, la importancia y las pérdidas económicas que perciben los caficultores sobre la erosión (Serna, 2009).

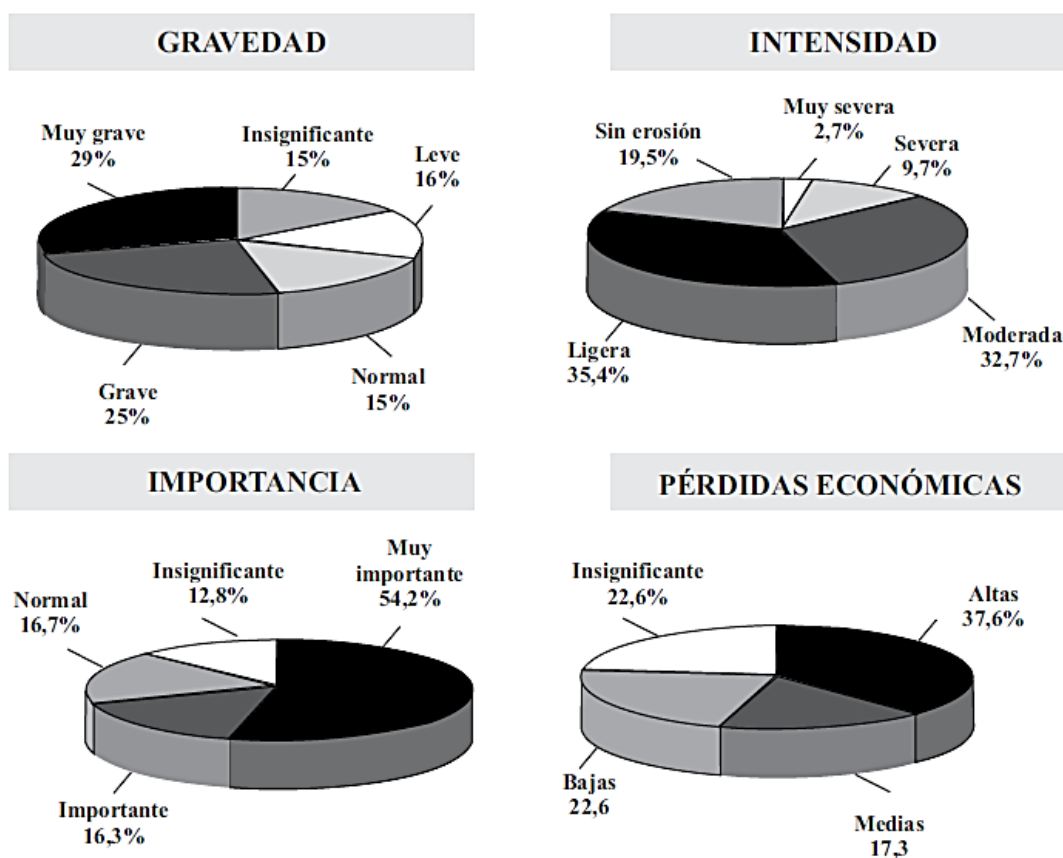


Figura 6. Distribución de la calificación dada a la erosión para cada variable.

Fuente: (Serna-Giraldo, 2009, pág. 95)

El grafico anterior es de especial interés, principalmente por el grado de importancia que los caficultores le dan a las pérdidas económicas producto de la erosión ya que esta distribución tan equilibrada puede explicar la gran variabilidad en la disposición a invertir (DPI) para mitigar dicha problemática.

El rango obtenido en el DPI abarcaba entre \$ 11.933 y \$ 4.000.000 ha.año-1 siendo la media de \$ 379.477, equivalente a US\$ 160,93 ha.año-1. Sin embargo el autor

afirma que este valor es muy impreciso ya que está fuertemente influenciado por los valores extremos, (\$ 444.000 y \$ 238.095.238) con lo cual un poco más del 20% de los caficultores tienen un DPI superior a la moda (Serna-Giraldo, 2009).

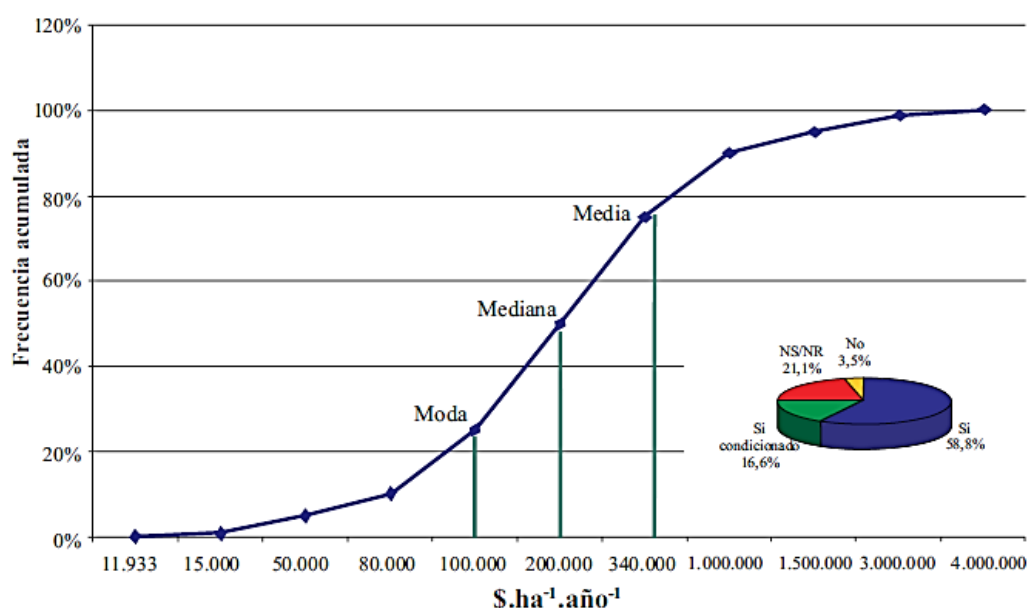


Figura 7. Disposición para invertir y valor asignado para evitar o controlar la erosión.

Fuente: (Serna-Giraldo, 2009, pág. 97)

En conclusión, se han hecho grandes avances en la medición y estudio de medidas para la mitigación de la erosión y aunque se han dado a conocer estos aspectos a un porcentaje significativo de la erosión, la gravedad del problema no se ve percibida en términos de pérdidas económicas, razón por la cual el DPI promedio se reduce considerablemente dejando incertidumbre sobre si este es lo suficientemente alto para mitigar los problemas de erosión.

Capítulo 3

Marco metodológico: Definición del modelo

Se propone partir del Principio Extremal de Prigogine para determinar si la producción de café en Colombia es sostenible desde el punto de vista de la economía termodinámica, ya que este afirma que “si un sistema se encuentra en estado estacionario estable, este se auto organiza de modo que minimiza la producción total de entropía” (Tsirlin & Kazakov, 2005, pág. 736).

Esto implica suponer la hipótesis de que cuando se minimiza la producción de entropía en el sistema (medida como el costo oculto de mitigar y prevenir la erosión), termodinámicamente se habría llegado al grado de sostenibilidad más alto y óptimo; cabe aclarar que es posible que desde otros enfoques existan grados óptimos de sostenibilidad diferentes, pero esta aplicación se limitara únicamente al enfoque termodinámico.

El siguiente paso es definir el macrosistema, en este caso es el de producción de café, el cual, para el caso de Colombia se distribuye en depósitos de recursos y agentes económicos; unos que producen café y otros que lo compran al precio representativo.

Los depósitos de recursos a nivel de microsubsistemas son no observables (los recursos, nutrientes y demás que requiere la producción de café), sin embargo a nivel macro todos estos pueden estar contenidos en una sola variable: la tierra, la cual se medirá en hectáreas pero se entenderá de forma diferente al concepto de “tierra” ricardiana en donde la tierra solo es el lugar donde se lleva a cabo la producción y donde

simplemente genera renta (Teubal, 2006), por tanto la tierra aquí se entenderá como el conglomerado de recursos necesarios y disponibles en el suelo para la producción de café; en ese sentido la variable tierra se puede entender como flujos de dichos recursos y cuando estos se acumulan, generan un stock.

Dado que en economía las variables flujo son aquellas que están medidas a lo largo del tiempo (series temporales) y las variables stock aquellas que se miden en un momento determinado (Cardenas, 2013) cabe hacer un par de aclaraciones más sobre la variable tierra:

- La tierra cosechada en hectáreas medida a lo largo del tiempo constituirá la variable flujo, cuando dicho flujo se acumule generando un stock, este valor implícitamente habrá contabilizado n veces el mismo terreno (donde n es el número de años), ya que adicionalmente la producción de café presenta 2 periodos de cosecha al año de manera regular: la principal y la mitaca, pero como aquí se entiende la tierra no como el espacio meramente bidimensional, sino como los recursos brindados a la producción en dicho espacio durante determinado número de años, esto no debe llevar a errores interpretativos.
- El stock de recursos es la medida del total de hectáreas cosechadas en n años.

$$\sum_{j=1}^k n_{iv} \quad (3)$$

Este flujo de recursos n_{iv} entra a un subsistema (de los agentes productores) generando un flujo de salida constituido por el café producido q_{iv} . Ahora bien, los

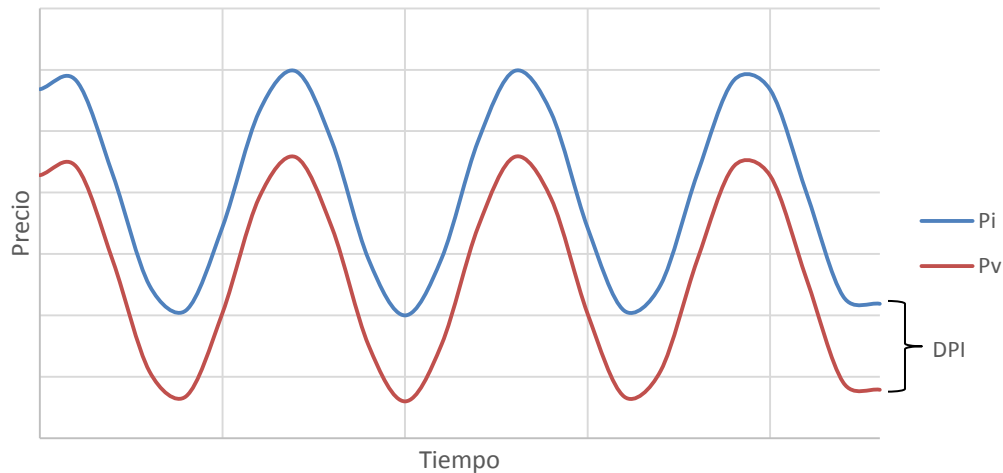
productores venden el café al precio representativo sobre el cual inciden variables externas al sistema (como la tasa de cambio, el precio de otros productores, la bolsa, etc.) esto hace que los flujos sean convectivos, (ya que difícilmente el productor podrá influir sobre el precio) y como la producción de todos modos tendrá lugar, la erosión se presentará de igual forma, lo que implicará un costo oculto que aquí se denominará “entropía”

Dicho costo por erosión será medido a través del DPI, si al precio representativo P_i se le resta el costo oculto por erosión, se encontrará el precio al que verdaderamente vende el productor P_v .

$$P_i - DPI = P_v \quad (4)$$

Lo que también se puede reescribir como:

$$DPI = P_i - P_v \quad (5)$$



*Figura 8. Disposición a invertir en mitigar el costo de la erosión (DPI).
Fuente: elaboración propia.*

Como el costo siempre va a ser positivo, una reducción en el precio representativo P_i forzará a una reducción en el precio al que realmente vende el productor P_v , y como a

pesar de ello la producción seguirá, el costo por erosión DPI dependerá de la cantidad de recurso tierra que entre al sistema, en ese sentido el flujo de recursos de la tierra se puede escribir, basados en el trabajo de Tsirlin y Kazakov (2005) como:

$$n_{iv} = \sum_{\mu} a_{iv} DPI \quad (6)$$

Donde a_{iv} es el coeficiente cinético que determina el impacto de los flujos convectivos entre la cantidad de tierra implementada y el costo de la erosión. El flujo de la producción que genera el flujo de la tierra es entonces: n_{iv} transpuesto multiplicado por el precio al que realmente se vende al asumir el costo oculto de la erosión:

$$q_{iv} = -p_v A_{iv} DPI^T \quad (7)$$

Donde el signo negativo hace referencia a que es un flujo de salida, A_{iv} es un vector columna de todos los a_{iv} de la ecuación del flujo de tierra, que en este caso al ser iguales (por tratarse de solo un recurso) es un escalar y P_v es el precio al que realmente vende el productor una vez asumido el costo oculto por erosión.

Continuando con el modelo de Tsirlin y Kazakov (2005), la entropía total σ en el periodo de tiempo de estudio será igual a la sumatoria del flujo de recursos contenidos en la tierra multiplicados por el DPI; sin embargo, como en la ecuación 5 el flujo de tierra está en función del DPI, esta sumatoria es multiplicada por $\frac{1}{2}$ para eliminar la doble contabilidad:

$$\sigma = \frac{1}{2} \sum_{i,v} (DPI * A_{iv} DPI^T) \quad (8)$$

Siendo esta el costo total oculto de la erosión expresada en dólares. Este será el mínimo óptimo, siempre y cuando el sistema se encuentre en estado estacionario estable. Para verificarlo, las variables que lo definen (producción, tierra, precio representativo y

costo total) tienen que cumplir dichas condiciones de manera conjunta, para lo cual se propone utilizar la metodología de modelos multivariados de series de tiempo, dado que la estimación de un modelo de Vectores Auroregresivos (VAR) establece dentro de sus características que las variables que lo componen se encuentren en estado estacionario y es posible determinar si la estimación cumple con las condiciones de estabilidad; o mediante la estimación de un modelo VEC, en caso de que las variables presenten relaciones de cointegración en el largo plazo.

En el caso de que los test en la aplicación de los modelos especificados anteriormente indiquen que no se presenta causalidad (en el sentido de Granger) y por tanto no sea posible la estimación del modelo multivariado; la estacionariedad y la estabilidad estructural de cada variable se analizaran individualmente mediante los test de raíz unitaria y la estimación de modelos tipo ARIMA o ARCH – GARCH cuando su volatilidad sea alta para la aplicación de la prueba de Chow, puesto que la no causalidad estadística no necesariamente indica que las variables no se causen en la práctica (Guisán, 2002).

Los datos para dichas estimaciones se obtuvieron de fuentes secundarias como la Federación nacional de cafeteros; para el precio representativo del café, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Food And Agriculture Organization Of The United Nations); para las hectáreas cosechadas al año, el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé); para los costos de producción y el Banco de la Republica de Colombia para el índice de precios al productor agrícola.

Finalmente se concluye que si el sistema no se encuentra en estado estacionario, o si no presenta condiciones de estabilidad, la entropía calculada no será un mínimo óptimo y por tanto la producción de café no será sostenible desde el punto de vista de esta aplicación de la termodinámica.

Capítulo 4

Aplicación del modelo

En el capítulo anterior se mencionó que las variables que definen el sistema son la producción, la tierra, el precio representativo y el costo total. Sin embargo, no todas estas variables se encuentran disponibles en fuentes secundarias por lo que en esos casos deben ser estimadas inicialmente.

La página web de la FAO ofrece un sistema de consulta que permite acceder a datos sobre producción, precios, entre otros, con una periodicidad anual. De allí se obtiene la información del volumen de la producción en toneladas y las hectáreas de tierra cosechada; de la división entre la producción y el área se obtiene el rendimiento promedio anual.

Por otro lado la Federación Nacional de Cafeteros ofrece información sobre el precio representativo mensual desde 1954, el volumen de la producción en sacos de café de 60 kilogramos cada uno y las hectáreas cosechadas anuales a partir de 2002.

Cabe hacer la distinción entonces entre área cultivada y área cosechada, si bien un cultivo de café en promedio tiene una duración de 5 años (en edad productiva, posteriormente se aconseja renovarlo), las hectáreas cultivadas a nivel mensual deben presentar una variación mínima. Como el volumen de la producción q_{iv} depende de las hectáreas cosechadas n_{iv} y el rendimiento de los cultivos R_{iv} , es posible obtener una

medida de hectáreas cosechadas a nivel mensual a partir del rendimiento promedio obtenido a partir de los datos de la FAO.

$$R_{iv} = \frac{q_{iv}}{n_{iv}} \quad (9)$$

Dichos datos, aunque provienen de fuentes diferentes coinciden en la medida de que la producción anual disponible en la FAO equivale a la suma de la producción mensual disponible en la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia¹, de esta forma al dividir la producción en el rendimiento promedio se obtendrán las hectáreas cosechadas mensualmente, cuya suma coincidirá con el dato de hectáreas cosechadas al año según la FAO.

$$n_{iv} = \frac{q_{iv}}{R_{iv}} \quad (10)$$

Para que todas las medidas sean comparables entre ellas, el precio representativo del café Colombiano, que originalmente viene dado en centavos de dólar por libra, se expresa en términos de dólar por tonelada².

Finalmente se obtiene el costo total promedio de producir una tonelada de café, para ello, el Ministerio de Agricultura dispone de un sistema de consulta en la página web www.agronet.gov.co donde se encuentran los costos de la producción según región productora, tipo de cultivo (tecnificado o tradicional) y tamaño del productor. Este dato

¹ Este hecho es verificable únicamente después de hacer la conversión de “miles de sacos de 60 kilogramos” a toneladas. Para ello se multiplican los datos por 60, obteniendo los datos en miles de kilogramos, que es lo mismo que toneladas.

² Esto se hace dividiendo por 100, obteniendo dólares por libra de 453.6 gramos, posteriormente en términos de dólar por tonelada multiplicando por 2,204.62 y finalmente se genera una variable paralela en términos de dólar por hectárea multiplicando por el rendimiento del cultivo en ese mismo año (toneladas/hectáreas).

se calcula para un solo periodo (2010 mes 12) y se proyecta a los demás mediante el IPP agrícola³. La metodología implementada para ello se describe al detalle en los anexos.

Según el trabajo de César Alberto Serna-Giraldo “Valoración contingente de la erosión de los suelos de la zona cafetera central de Colombia”, en promedio un productor de café está dispuesto a pagar \$ 379,477 COP por hectárea para la mitigación o prevención de la erosión. Dicho costo es denominado DPI (Disposición para invertir en evitar o controlar la erosión de los suelos en la finca). Este valor se expresará en dólares según la TRM (\$ 2,156.29) y se tomará como el costo promedio de la erosión desde el punto de vista del productor, el cual puede ser diferente de un costo valorado geológicamente.

Ahora bien, este valor se puede proyectar para los demás periodos a partir de la ecuación 5 (ya que se dispone de los valores del flujo de tierra y el coeficiente cinético es una constante). Con el cálculo del DPI para todos los periodos se podría proceder a encontrar el mínimo óptimo de entropía siempre y cuando el sistema se encuentre en estado estacionario estable. Para ello es necesario verificar entonces varios aspectos: si estas se pueden cointegrar en un sistema de ecuaciones que describa sus relaciones causales y si este sistema es estable, o si las variables individualmente se encuentran en estado estacionario estable.

³ El IPP agrícola se encuentra disponible entre 1970 y 2015, para los años anteriores se realiza un encadenamiento a partir del IPC, esta estimación se explica al detalle en los anexos.

Pero ¿Qué se entiende por estacionariedad y por estabilidad? Básicamente la estacionariedad es aquella condición en la que a nivel estructural pueden presentarse ligeras variaciones, pero a nivel coyuntural no existe una tendencia al crecimiento o al decrecimiento, matemáticamente esto implicaría que la media, la varianza y la covarianza de una variable permanezcan constantes en el tiempo (Gujarati, 2009). La estabilidad por otra parte puede referirse a la estabilidad de la serie (que no haya ningún quiebre estructural en los datos a lo largo del tiempo) o a la estabilidad del modelo empleado para explicar la variable (coeficientes significativos, no multicolinealidad, raíces inversas estables y residuales ruido blanco).

La mayoría de series de tiempo que comúnmente se analizan en economía, rara vez se encuentran en estado estacionario, sin embargo, existen diferentes transformaciones que permiten expresarlas de dicho modo, por esa razón es necesario verificar primero la estacionariedad y la estabilidad para que en el caso de emplear las series transformadas en el cálculo de la entropía mínima óptima, se pueda realizar un análisis adecuado (no es lo mismo hablar de la variable producción en niveles que del incremento en la misma).

4.1. Estimación del modelo VEC

Anteriormente se han mencionado las 4 variables que definen el sistema, sin embargo, una de ellas: la tierra, se obtuvo a partir de una combinación lineal de la producción (al dividir la producción en el rendimiento por hectárea), razón por la cual dicha variable debe ser excluida de la estimación del modelo aunque, se empleara en el análisis dado que es relevante dentro del sistema y que representa una gran cantidad de

recursos que no son medibles independientemente por la limitación de datos. Posteriormente se evalúa la causalidad entre las variables, mediante la aplicación del test propuesto por Granger, cuya hipótesis nula afirma que las variables no se causan entre ellas; con un nivel de significancia del 5% se encuentra que el precio representativo y el costo se causan entre ellas, es decir son endógenas en el modelo, mientras que la producción es independiente del precio representativo y del costo total. A pesar de ello se prosigue con la aplicación del Test de Johansen para verificar si existe alguna relación de cointegración en el largo plazo.

Tabla 4. Test de causalidad de Granger.

Pairwise Granger Causality Tests			
Sample: 1961M01 2015M05			
Lags: 5			
Null Hypothesis:	Obs	F-Statistic	Prob.
P_i does not Granger Cause q_{iv}	645	0.67282	0.6442
q_{iv} does not Granger Cause p_i		0.44604	0.8163
CT_{ha} does not Granger Cause q_{iv}	645	2.11076	0.0624
q_{iv} does not Granger Cause CT_{ha}		0.52119	0.7603
CT_{ha} does not Granger Cause P_i	645	2.32363	0.0417
P_i does not Granger Cause CT_{ha}		4.78927	0.0003

Fuente: elaboración propia.

Los resultados indican que existe relación de cointegración entre las variables y plantea dos posibilidades: i) ecuación de cointegración con intercepto pero sin tendencia, señalado por el criterio de información propuesto por Schwarz) y ii) ecuación de cointegración con intercepto y tendencia, sugerido por el criterio de información de Akaike. Evaluando ambas posibilidades, la primera presenta un mejor ajuste y por esto es aquella estimación la que se expone en este trabajo.

Tabla 5. Test de cointegración de Johansen.

Sample: 1961M01 2015M05
Included observations: 645

Series: q_{iv} , P_i y CT_{ha}

Lags interval: 1 to 4

<i>Selected (0.05 level*) Number of Cointegrating Relations by Model</i>					
Data Trend:	None	None	Linear	Linear	Quadratic
Test Type	No Intercept No Trend	Intercept No Trend	Intercept No Trend	Intercept Trend	Intercept Trend
Trace	1	1	1	1	3
Max-Eig	1	1	2	1	3

**Critical values based on MacKinnon-Haug-Michelis (1999)*

Information Criteria by Rank and Model

Data Trend:	None	None	Linear	Linear	Quadratic
Rank or No. of CEs	No Intercept No Trend	Intercept No Trend	Intercept No Trend	Intercept Trend	Intercept Trend
<i>Log Likelihood by Rank (rows) and Model (columns)</i>					
0	-14693.26	-14693.26	-14691.78	-14691.78	-14691.67
1	-14681.40	-14666.57	-14665.10	-14662.88	-14662.78
2	-14676.93	-14659.01	-14657.57	-14653.75	-14653.70
3	-14676.37	-14657.44	-14657.44	-14650.96	-14650.96
<i>Akaike Information Criteria by Rank (rows) and Model (columns)</i>					
0	45.67213	45.67213	45.67684	45.67684	45.68581
1	45.65397	45.61107	45.61272	45.60895	45.61482
2	45.65869	45.60932	45.60796	45.60234*	45.60527
3	45.67558	45.62617	45.62617	45.61538	45.61538
<i>Schwarz Criteria by Rank (rows) and Model (columns)</i>					
0	45.92157	45.92157	45.94707	45.94707	45.97683
1	45.94499	45.90902*	45.92453	45.92768	45.94742
2	45.99129	45.95577	45.96134	45.96958	45.97944
3	46.04975	46.02113	46.02113	46.03112	46.03112

Fuente: elaboración propia.

Con un nivel de significancia del 5% la ecuación de cointegración que describe las variables incluidas en el modelo se puede escribir como:

$$q_{iv-1} = -9.5727CT_{ha-1} - 46,369.75 \quad (11)$$

donde el sistema de ecuaciones es:

$$\begin{pmatrix} \Delta q_{iv} \\ \Delta P_i \\ \Delta CT_{ha} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.56 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} CointEq1 + \begin{pmatrix} 0.24 & 0 & 0 \\ 0 & 0.26 & 0 \\ 0 & 0.02 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta q_{iv-1} \\ \Delta P_{i-1} \\ \Delta CT_{ha-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.78 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta q_{iv-2} \\ \Delta P_{i-2} \\ \Delta CT_{ha-2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_{1t} \\ \varepsilon_{2t} \\ \varepsilon_{3t} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Los resultados del test de Johansen indican que existe una relación de cointegración al largo plazo donde el sistema de ecuaciones en conjunto se encuentra en estado estacionario, no obstante, son pocos los coeficientes estimados significativos

estadísticamente; situación que refuerza los resultados obtenidos a partir del test de causalidad de Granger, puesto que la producción de café es explicada únicamente por su comportamiento histórico (y no a partir de una relación con el precio o el costo) Y aunque existe una leve relación entre el precio y el costo (Ver ecuación 9), en efecto, el modelo presenta problemas de causalidad en el sentido de Granger por lo que las variables se evaluarán individualmente en el próximo apartado.

Adicional a ello, al evaluar la estabilidad del modelo, se encuentra que no todos los valores propios de la matriz de coeficientes estimada son menores a uno, (raíces inversas), al encontrar que dos de ellas se encuentran sobre la frontera, lo cual indica que el sistema de ecuaciones en su conjunto tampoco cumple con las condiciones de estabilidad (Ver figura 7).

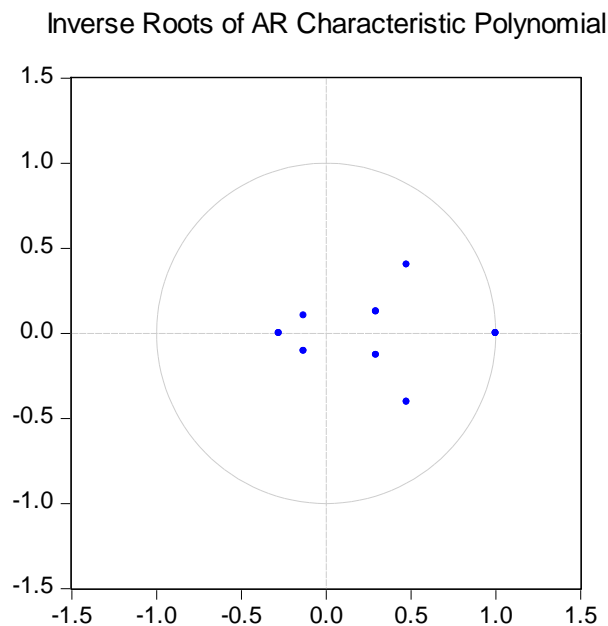


Figura 9. Test de estabilidad modelo VEC.

Fuente: elaboración propia.

Finalmente se evalúan las condiciones ruido blanco, mediante los test de Portmanteau y autocorrelación serial, así como el de normalidad. Los dos primeros test indican que con un nivel de significancia del 5% a partir del quinto rezago los residuos están fuertemente correlacionados entre sí, por lo que existe poder explicativo en ellos y en teoría habrían variables que faltaría incorporar al modelo (Ver anexo).

En cuanto a la normalidad de los residuos, el test de normalidad conjunta indica que a un nivel de significancia del 5% estos no se distribuyen de forma normal, lo que en definitiva implica la presencia de poder explicativo en los términos de perturbación (Ver anexo).

En conclusión las variables se encuentran cointegradas en el largo plazo y el sistema como un todo se podría encontrar en estado estacionario. No obstante, dicho sistema presenta problemas tanto de causalidad y estabilidad como de autocorrelación y normalidad en los residuos. Como se verá más adelante, el poder explicativo en los residuos no implica necesariamente la ausencia de una variable en la estimación sino que se debe a la alta estacionalidad de la variable producción, esto hace que este fuertemente relacionada con sí misma en el pasado y sea difícil tratar de explicarla mediante otras variables.

El hecho de que las variables no sean causales en el sentido de Granger indica que el ejercicio de estimar un VEC podría dar lugar a una regresión espuria, pero existen autores como Carmen Guisán que exponen problemas teóricos en cuanto a la causalidad en el sentido de Granger y la categorización de algunas regresiones como espurias sin que estas necesariamente lo sean. Una de las principales razones es que los modelos tipo

VAR consideran a priori todas las variables como endógenas, lo que da lugar a análisis que en ocasiones suelen alejarse de la teoría económica, dado su carácter mecanicista que no contempla otro tipo de evidencias. (Guisán, 2002).

En ese sentido es posible encontrar numerosas estimaciones no cointegradas pero que en teoría si tengan alguna relación causal, por lo cual no puede existir una identidad entre la no cointegración y la no causalidad (Guisán, 2002), por el contrario, si se tiene un fuerte fundamento teórico, no se deben malinterpretar los resultados estadísticos y negar la causalidad entre variables que están claramente relacionadas en ese sentido.

Basados en lo anterior se considera que es posible afirmar que el sistema se encuentra en estado estacionario siempre y cuando sus variables lo estén individualmente, lo cual se verificara a continuación.

4.2. Análisis individual de las variables

4.2.1 Estacionariedad

Para realizar un análisis de Estacionariedad se debe tener en cuenta que la producción de café es un proceso estocástico debido a que está definido por una serie de variables que cambian a lo largo del tiempo. Este proceso es de estado continuo (por los valores que toma cada variable) y de tiempo discreto (meses).

Existen diferentes métodos para realizar un análisis de Estacionariedad, aquí se aplicaran algunos de los más conocidos sin ahondar en profundidades teóricas.

4.2.1.1. Producción

Se dice que una serie es estacionaria si no es visible en ella algún tipo de tendencia determinista, ya que se parte del supuesto de que cada dato es producto de un proceso estocástico; y si su varianza es relativamente constante (no incremente ni disminuya a través del tiempo)

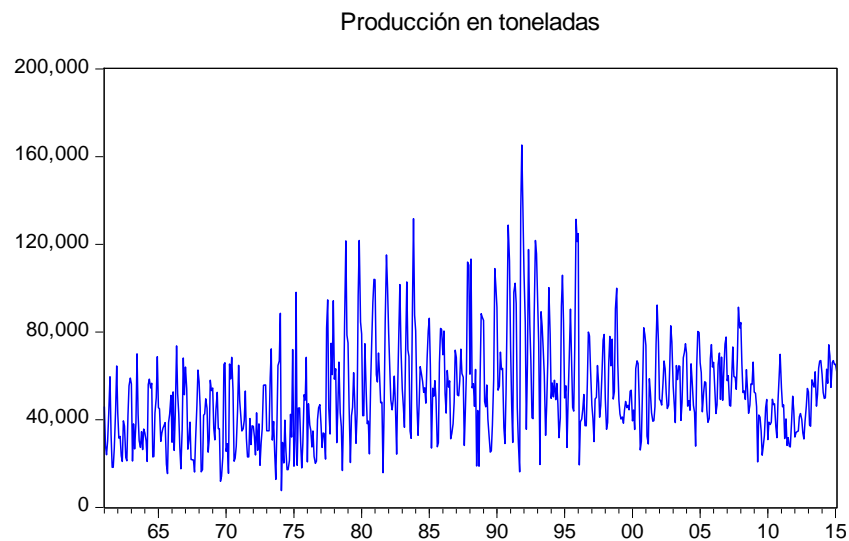


Figura 10. Producción mensual de café en toneladas
Fuente: elaboración propia.

La primera variable que se evaluó fue la producción de café, en ella si bien no es clara una tendencia, esta existe ligeramente ya que en enero de 1961 esta inicia alrededor de las 40 mil toneladas y a febrero de 2015 está entre las 65 y 75 mil, este tipo de tendencia se conoce como “estocástica”, porque no es siempre creciente en el tiempo sino que presenta una fuerte variabilidad a modo de paseo aleatorio (Gujarati, 2009). Por otro lado, la varianza es más alta entre 1980 y 1995 que con respecto a los otros periodos.

En estas condiciones se aplica la transformación Box-Cox⁴ (para tratar de minimizar la varianza) obteniendo un lambda óptimo de 1, lo que implica no transformar la serie, sin embargo se aplican las primeras diferencias para eliminar la tendencia obteniendo:

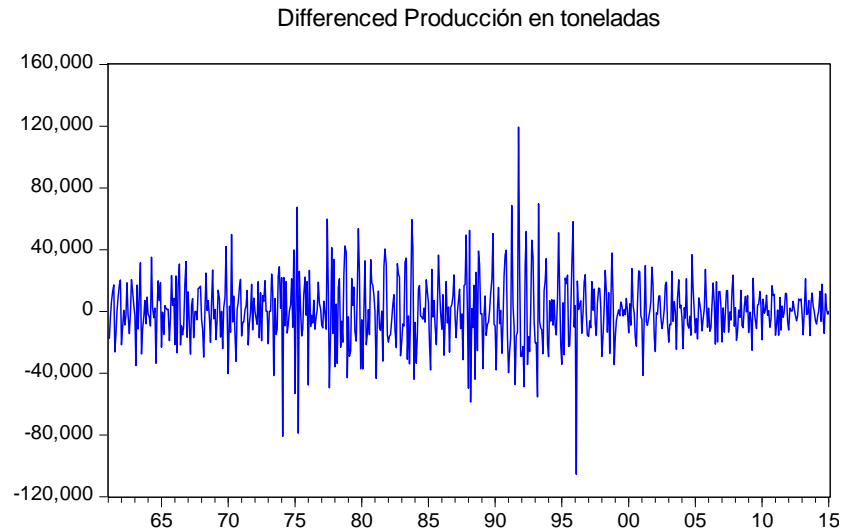


Figura 11. Producción mensual de café en primeras diferencias.
Fuente: elaboración propia.

Donde la media es cero y es constante, aunque la varianza continua presentando alta volatilidad en algunos periodos.

Para la verificación de la estacionariedad se aplica la prueba de Dickey Fuller aumentada. El test formula la siguiente prueba de hipótesis:

H_0 : La serie tiene Raíz unitaria, hay caminata aleatoria; $\delta = 0$

H_1 : la prueba no tiene raíz unitaria; $\delta < 0$

⁴ Todas las transformaciones Box-Cox se encuentran detalladas en los anexos.

Tomando como nivel de significancia un $\alpha=0.05$, y empleando como criterio de decisión el p valor, sonde si $P\text{ value} < \alpha$ se rechaza la hipótesis nula y se afirma que la producción en primeras diferencias es estacionaria.

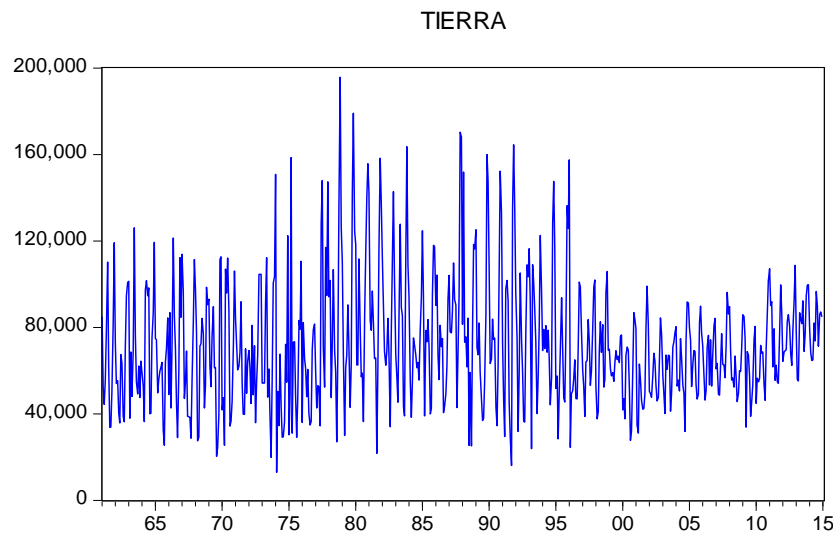
Tabla 6. Test de raíz unitaria: toneladas producidas I(1) S(12)

Null Hypothesis: SDQ_T has a unit root		
Exogenous: None		
Lag Length: 12 (Automatic - based on SIC, maxlag=19)		
	t-Statistic	Prob.*
<i>Augmented Dickey-Fuller test statistic</i>	-10.69116	0.0000
Test critical values: 1% level	-2.568673	
5% level	-1.941331	
10% level	-1.616358	

Fuente: elaboración propia.

4.2.1.2. Tierra

La segunda variable evaluada fue la tierra, ahora bien, cabe aclarar que si bien a esta variable se le realizará un análisis de estacionariedad, esta no se modelara ya que como se mencionó anteriormente su método de obtención fue mediante una combinación lineal de la producción y tratar de hacerlo implicaría incurrir en errores de multicolinealidad.



*Figura 12. Hectáreas de tierra cosechadas mensualmente.
Fuente: elaboración propia.*

Esta serie presenta una notable tendencia estocástica, que es distorsionada visualmente por la alta variabilidad durante el periodo entre 1975 y 1995, pero que está claramente presente. Nótese que en este caso la varianza se reduce a partir del año 1996 lo cual daría indicios de que la serie no es estacionaria. Sin embargo al tratar de aplicar la transformación Box-Cox, el lambda óptimo es igual a 1, por lo que la serie en teoría no debería ser transformada para minimizar dicha varianza; para eliminar la tendencia se aplican las primeras diferencias, donde la media se hace cero y si bien la varianza se hace un poco más estable, continua presentando fuertes variaciones en el periodo ya mencionado.

A pesar de ello, el test de raíz unitaria indica que con un nivel de significancia del 5%, la tierra en primeras diferencias es una variable en estado estacionario.

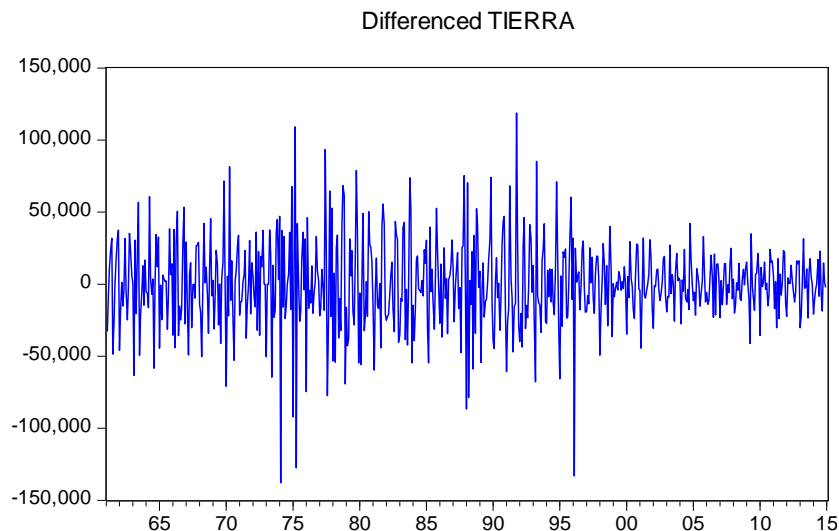


Figura 13. Hectáreas de tierra cosechadas mensualmente en primeras diferencias.
Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Test de raíz unitaria: hectáreas cosechadas $I(1)$ $S(12)$

Null Hypothesis: SDTIERRA has a unit root		
Exogenous: None		
Lag Length: 16 (Automatic - based on SIC, maxlag=19)		
	t-Statistic	Prob.*
<i>Augmented Dickey-Fuller test statistic</i>	-11.69351	0.0000
Test critical values:		
1% level	-2.568709	
5% level	-1.941336	
10% level	-1.616355	

Fuente: elaboración propia.

4.2.1.3. Precio representativo del café

La tercera variable evaluada fue el precio representativo del café, en este caso la tendencia estocástica es aún más marcada que en los casos anteriores, la serie en definitiva no es estacionaria en su forma original, sin embargo la metodología Box-Cox con un lambda de -1 sugiere una transformación de la serie de forma $1/Y$.

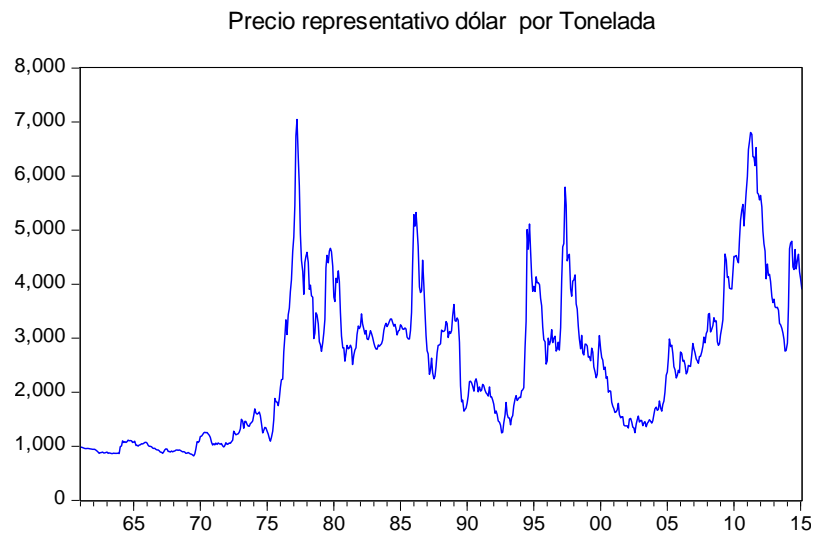


Figura 14. Precio representativo del café (mensual)
Fuente: elaboración propia.

Los resultados con la nueva serie disminuyen notablemente la varianza pero aun así se requiere de las primeras diferencias para la eliminación de la tendencia estocástica.

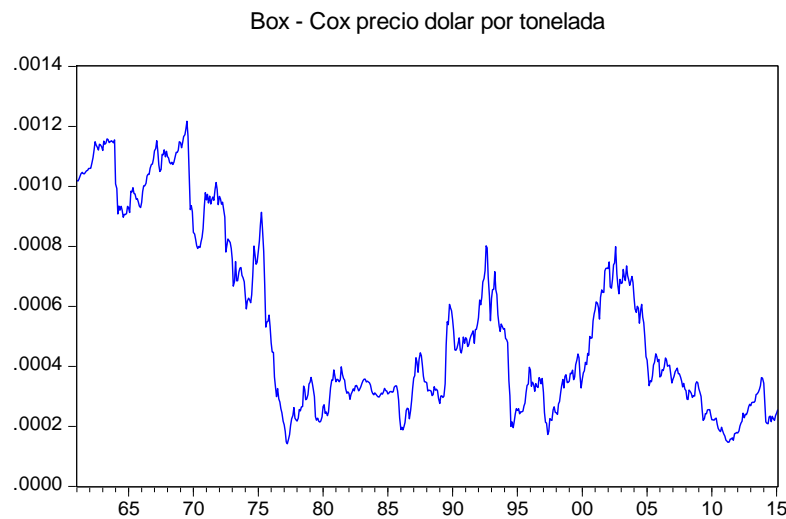


Figura 15. Transformación Box - Cox Precio representativo del café.
Fuente: elaboración propia.

La diferenciación hace que la media sea cero, pero a su vez hace evidente la alta volatilidad del precio. Esto es entendible en la medida de que en este influyen muchos factores del comercio internacional e incluso el precio mismo del dólar frente al peso.

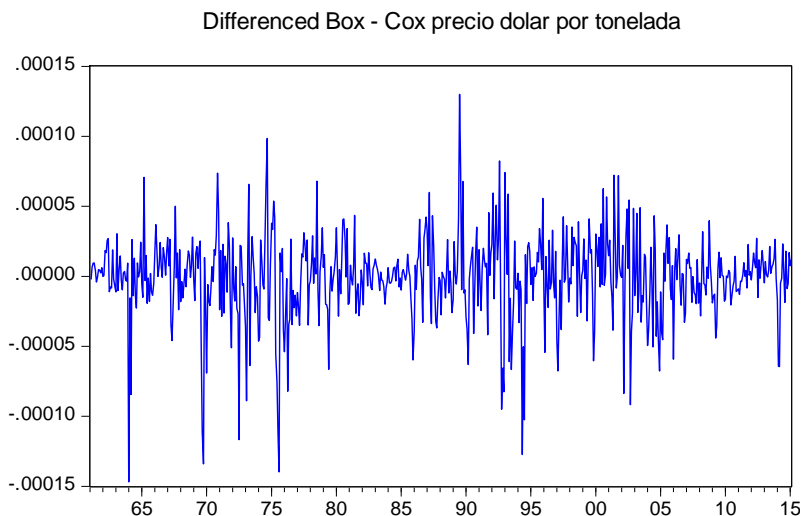


Figura 16. Precio del café dólar por tonelada, transformación Box - Cox en primeras diferencias.
Fuente: elaboración propia.

A pesar de ello, el test de raíz unitaria indica que con un nivel de significancia del 5% la serie transformada por Box-Cox del precio por tonelada en primeras diferencias es estacionaria.

Tabla 8. Test de raíz unitaria: precio dólar por tonelada $I(1)$

Null Hypothesis: DBXCP_DT has a unit root		
Exogenous: None		
Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=19)		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-19.66305	0.0000
Test critical values: 1% level	-2.568536	
5% level	-1.941312	
10% level	-1.616371	

Fuente: elaboración propia

4.2.1.4. Costo total por hectárea

Finalmente la cuarta variable es el costo total promedio por hectárea, el cual presenta tendencia y fuerte varianza. Al igual que con el precio por tonelada, la metodología Box – Cox con un lambda de -1 sugiere que la serie sea transformada a $1/Y$.

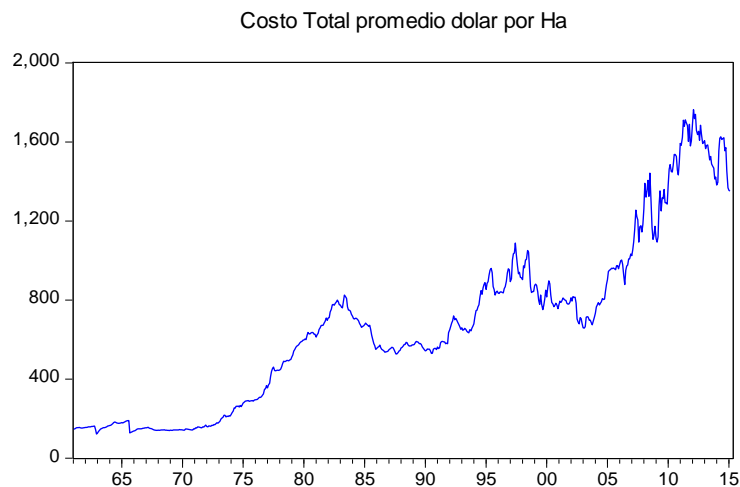


Figura 17. Costo total promedio, dólar por hectárea.

Fuente: elaboración propia.

Dicha transformación reduce la varianza significativamente, sin embargo para la eliminación de la tendencia hace falta aplicar las primeras diferencias.

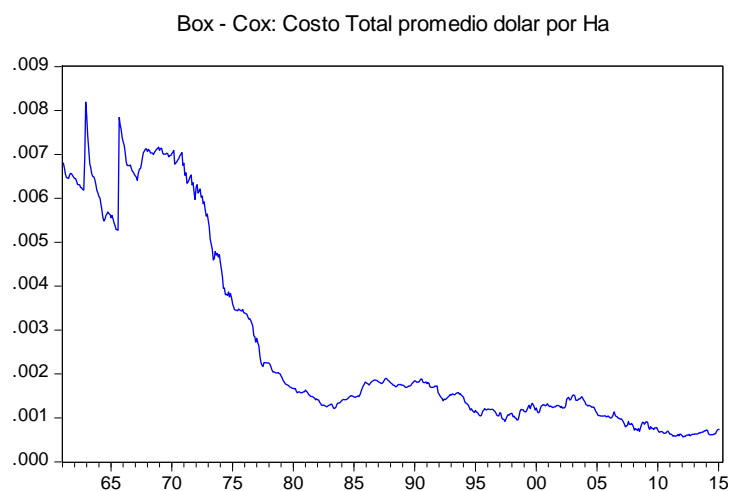


Figura 18. Transformación Box - Cox Costo total promedio dólar por hectárea.

Fuente: elaboración propia.

Al hacer esto, la media se hace constante en cero, aunque la varianza presenta valores atípicos durante los primeros años (anteriores a 1975), lo que hace dudar de su Estacionariedad.

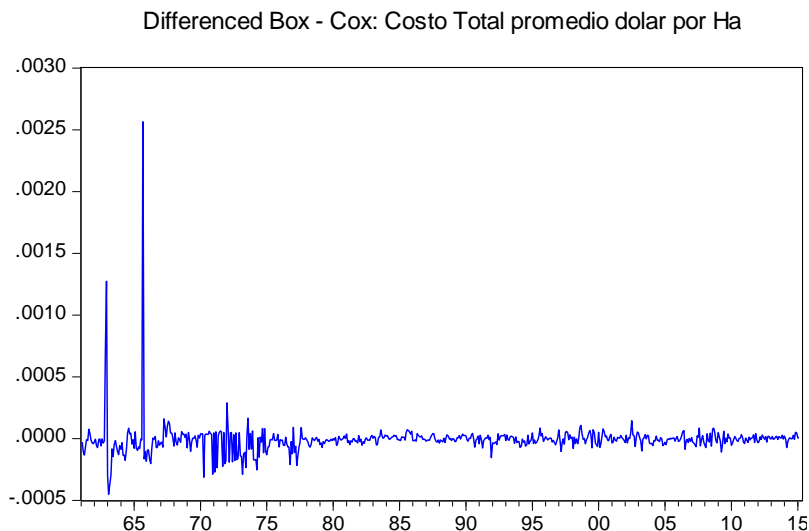


Figura 19. Costo total dólar por hectárea, transformación Box - Cox en primeras diferencias.
Fuente: elaboración propia.

A pesar de ello el test de raíz unitaria indica que con un nivel de significancia del 5% la transformación Box-Cox del costo total por hectárea de producir café en primeras diferencias es estacionario.

Tabla 9. Test de raíz unitaria: Costo total promedio, dólar por tonelada I(1)

Null Hypothesis: D(BXCCTDH) has a unit root		
Exogenous: None		
Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=19)		
	t-Statistic	Prob.*
<i>Augmented Dickey-Fuller test statistic</i>	-23.07489	0.0000
Test critical values:	-2.568536	
	-1.941312	
	-1.616371	

Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Estabilidad

En el apartado anterior se demostró la Estacionariedad de las series, por lo que es poco probable que la estimación del sistema sea espuria, más porque la relación causal teórica es notablemente fuerte; por sentido común, la cantidad producida debe tener una influencia en el precio así como el costo de producir debe influir en el precio y en la cantidad; entonces ¿A qué se debe que las variables no puedan ser cointegradas?

Al observar las gráficas del punto anterior se puede decir que adicional a la fuerte dependencia de la producción por su pasado, entre otras causas se encuentra la periodicidad y el carácter de los datos. Los datos se encuentran mensuales desde 1961 hasta febrero de 2015 (en algunos casos solo hasta diciembre 2014), es decir que el número de observaciones es relativamente amplio, ahora bien, por el lado del precio representativo, este se ve fuertemente afectado por variables de comercio exterior e incluso por la tasa de cambio, lo que le da una alta volatilidad; por el lado de la cantidad producida esta depende del rendimiento del cultivo, empero el rendimiento depende de las diferentes edades productivas del cultivo así como de las tecnificaciones y el tamaño del productor, todos estos factores junto con las bonanzas le dan un carácter de alta volatilidad y finalmente el costo, el cual se obtiene de una proyección a partir del IPP agrícola, aunque es estacionario presenta volatilidades fuertes en los periodos donde la tendencia de la economía era inflacionista.

Dichas características de volatilidad no son un inconveniente en sí mismo, pues sencillamente, aunque las variables no se puedan cointegrar estadísticamente, pueden ser explicadas por su pasado, es decir mediante la aplicación de modelos tipo ARIMA, ARCH - GARCH⁵, manteniendo la relación causal de manera teórica y analizando la estabilidad de cada variable individualmente.

⁵ Se estiman como modelos con heterocedasticidad condicional y no como simples autorregresivos de media móvil dado que la alta volatilidad genera una concentración de los datos con respecto a la media que dificulta que los residuales se distribuyan de forma normal y no estén correlacionados.

Es importante señalar en este punto que la estabilidad a la que hace referencia el Principio Extremal de Prigogine es la estabilidad del estado estacionario, por lo cual, la estabilidad a evaluar en este apartado es la estructural, lo que implica que no existan puntos de quiebre en la serie de tiempo de cada variable, para lo cual se empleara la prueba de Chow en cada modelo, identificando los posibles puntos críticos en los que se podría presentar.⁶

4.2.2.1 Producción

El modelo estimado para la producción fue un SARIMA (0, 1, 2) X (12, 0, 0)₁₂, los posibles puntos de quiebre estructural fueron identificados en la figura 9, se escogieron los 4 más sobresalientes: febrero de 1974, febrero de 1975, febrero de 1996 y febrero de 1997.

La hipótesis nula afirma que no hay cambios estructurales, es decir que la serie permanece estable, el criterio de decisión es el valor p, la hipótesis nula se acepta si este es mayor al nivel de significancia del 0.05.

Los resultados obtenidos indican que hubo cambios estructurales en febrero de 1975 y en febrero de 1997 razón por la cual se rechaza la hipótesis nula y se afirma que la serie no presenta estabilidad.

⁶ La estimación de los modelos no se presenta en esta sección dado que se especifican en los anexos.

Tabla 10. Prueba de Chow: Toneladas producidas 1974M02

Chow Breakpoint Test: 1974M02			
F-statistic	1.485922	Prob. F(3,619)	0.2172
Log likelihood ratio	4.484846	Prob. Chi-Square(3)	0.2136
Wald Statistic	9.127246	Prob. Chi-Square(3)	0.0276

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11. Prueba de Chow: Toneladas producidas 1975M02.

Chow Breakpoint Test: 1975M02			
F-statistic	2.845451	Prob. F(3,619)	0.0370
Log likelihood ratio	8.560206	Prob. Chi-Square(3)	0.0357
Wald Statistic	17.69244	Prob. Chi-Square(3)	0.0005

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Prueba de Chow: Toneladas producidas 1996M02.

Chow Breakpoint Test: 1966M02			
F-statistic	0.757974	Prob. F(3,619)	0.5180
Log likelihood ratio	2.291757	Prob. Chi-Square(3)	0.5141
Wald Statistic	573.8550	Prob. Chi-Square(3)	0.0000

Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Prueba de Chow: Toneladas producidas 1997M02.

Chow Breakpoint Test: 1997M02			
F-statistic	4.550036	Prob. F(3,619)	0.0036
Log likelihood ratio	13.63265	Prob. Chi-Square(3)	0.0035
Wald Statistic	13.01956	Prob. Chi-Square(3)	0.0046

Fuente: elaboración propia.

4.2.2.2. Precio representativo del café

Para el caso del precio representativo se empleó un modelo GARCH ya que este presentaba una alta volatilidad que impedía que sus residuos se distribuyeran de forma normal en una estimación tipo ARIMA y adicionalmente la varianza requería ser modelada. A partir de estos resultados se realiza la prueba de Chow para los posibles puntos críticos identificados en la figura 14 (aquellos donde la varianza es mayor): septiembre de 1974, agosto de 1975, julio de 1989 y mayo de 1994.

Tabla 14. Prueba de Chow: Precio representativo 1974M09.

Chow Breakpoint Test: 1974M09			
F-statistic	1.084425	Prob. F(2,630)	0.3387
Log likelihood ratio	2.178872	Prob. Chi-Square(2)	0.3364
Wald Statistic	2.168850	Prob. Chi-Square(2)	0.3381

Fuente: elaboración propia.

Tabla 15. Prueba de Chow: Precio representativo 1975M08.

Chow Breakpoint Test: 1975M08			
F-statistic	0.173920	Prob. F(2,630)	0.8404
Log likelihood ratio	0.349952	Prob. Chi-Square(2)	0.8395
Wald Statistic	0.347840	Prob. Chi-Square(2)	0.8404

Fuente: elaboración propia.

Tabla 16. Prueba de Chow: Precio representativo 1989M07.

Chow Breakpoint Test: 1989M07			
F-statistic	0.429441	Prob. F(2,630)	0.6511
Log likelihood ratio	0.863747	Prob. Chi-Square(2)	0.6493
Wald Statistic	0.858883	Prob. Chi-Square(2)	0.6509

Fuente: elaboración propia.

Tabla 17. Prueba de Chow: Precio representativo 1994M05.

Chow Breakpoint Test: 1994M05			
F-statistic	3.325247	Prob. F(2,630)	0.0366
Log likelihood ratio	6.657640	Prob. Chi-Square(2)	0.0358
Wald Statistic	6.650494	Prob. Chi-Square(2)	0.0360

Fuente: elaboración propia.

Conservando la formulación de la prueba de hipótesis, ya expuesta en el modelo anterior, se puede afirmar que a un nivel de significancia del 5% no existe un quiebre estructural en los primeros 3 puntos identificados, no obstante, en mayo de 1994 la hipótesis nula se rechaza y se afirma que si bien la serie en diferencias del precio representativo del café es estacionaria, esta no es estable.

4.2.2.3. Costo total por hectárea

Para el costo total el modelo empleado fue un GARCH puesto que los residuos no se distribuían de forma normal producto de una alta volatilidad originada en el método de cálculo del costo (a partir del IPP) que absorbe inevitablemente la tendencia general en el nivel de precios del sector agrícola en Colombia. En la figura 17 se identifican 4 puntos críticos para realizar la prueba de Chow: diciembre de 1962, septiembre de 1965, enero de 1972 y enero de 1973.

Tabla 18. Prueba de Chow: costo total promedio dólar por tonelada 1962M12.

Chow Breakpoint Test: 1962M12			
F-statistic	0.327942	Prob. F(1,646)	0.5671
Log likelihood ratio	0.328874	Prob. Chi-Square(1)	0.5663
Wald Statistic	0.327942	Prob. Chi-Square(1)	0.5669

Fuente: elaboración propia.

Tabla 19. Prueba de Chow: costo total promedio dólar por tonelada 1965M09.

Chow Breakpoint Test: 1965M09			
F-statistic	19.18474	Prob. F(1,646)	0.0000
Log likelihood ratio	18.96391	Prob. Chi-Square(2)	0.0000
Wald Statistic	19.18473	Prob. Chi-Square(2)	0.0000

Fuente: elaboración propia.

Tabla 20. Prueba de Chow: costo total promedio dólar por tonelada 1972M01.

Chow Breakpoint Test: 1972M01			
F-statistic	1.554527	Prob. F(1,646)	0.2129
Log likelihood ratio	1.557467	Prob. Chi-Square(2)	0.2120
Wald Statistic	1.554527	Prob. Chi-Square(2)	0.2125

Fuente: elaboración propia.

Tabla 21. Prueba de Chow: costo total promedio dólar por tonelada 1973M01.

Chow Breakpoint Test: 1973M01			
F-statistic	4.280184	Prob. F(1,646)	0.0390
Log likelihood ratio	4.279274	Prob. Chi-Square(2)	0.0386
Wald Statistic	4.280184	Prob. Chi-Square(2)	0.0386

Fuente: elaboración propia.

La formulación de la prueba de hipótesis es la misma, pero los resultados cambian, a un nivel de significancia del 5% se rechaza la hipótesis nula y se afirma que el costo total promedio presenta varios quiebres estructurales, en este caso se identificaron 2 pero podrían existir más dado que la varianza de esta serie es muy baja en los años posteriores a 1975 con respecto a periodos anteriores, por lo cual la Estacionariedad de la serie no es estable.

Para concluir el análisis de estabilidad se podría afirmar que aunque las 4 variables que definen el modelo: las toneladas producidas, las hectáreas cosechadas, el precio representativo y el costo total promedio en dólares por hectárea se pueden expresar de tal forma que sean estacionarias, ello no logra eliminar los quiebres estructurales de

las series haciendo que dicho estado estacionario no sea estable, por lo cual la cantidad de entropía a calcular no sería un mínimo óptimo.

Aun así se continuara con la metodología para que el lector tenga una idea de que sucedería en caso de que las variables se encontraran en estado estacionario estable, verificado individualmente como se realizó anteriormente o mejor aún, en caso de ser posible, mediante un modelo VAR o VEC.

4.3. Calculo de la entropía (costo oculto por erosión)

Como se mencionó en el marco metodológico, a partir de la ecuación 4 es posible calcular el DPI para los meses anteriores (ya que solo se dispone para diciembre de 2009); esto se debe a que sobre el precio influyen variables externas al sistema por lo que difícilmente el productor podrá influir sobre él teniendo aun así que asumir el costo de mitigar y prevenir la erosión. Esto significa que las variaciones entre el precio representativo P_i y el precio al que realmente vende el productor descontando el costo de la erosión P_v presentan la misma variación mensual, es decir que a partir de la variación mensual de P_i se puede calcular el P_v para el resto de los meses y de la diferencia entre ambos valores se obtendrá el DPI.

Graficando los resultados en niveles se observa como el precio presenta una alta volatilidad caracterizada por ciclos de auge y contracción, sin embargo en ninguno de los casos el costo estimado llega a ser superior al precio. Nótese como a pesar de que el costo es una proyección con el IPP agrícola, su comportamiento se relaciona levemente con los ciclos del precio y como, con respecto a los costos de producir, el DPI es significativo pues en algunos periodos llegan a ser similares y en otros ronda el 30%.

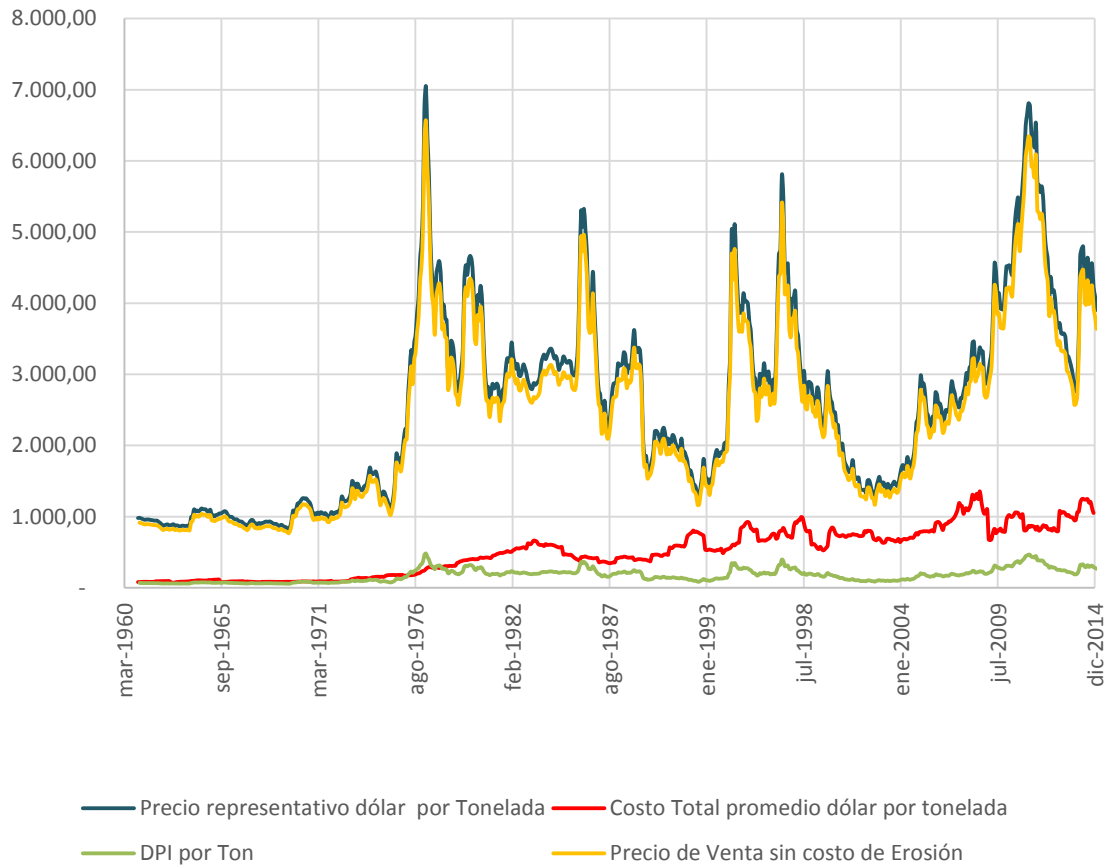


Figura 20. Precios y costos del Café en dólares por tonelada.
 Fuente: elaboración propia.

Finalmente, teniendo en cuenta que las variables son estacionarias expresándolas en diferencias, el cálculo de la entropía debe hacerse igualmente con el DPI en diferencias y expresando la ecuación 7 como:

$$\partial\sigma = \frac{1}{2} \sum \delta(DPI * n_{iv}) \quad (13)$$

Es decir que en vez de obtener el mínimo óptimo del costo oculto total de la erosión según la disposición a invertir en ello por parte de los caficultores, se obtendrá el acumulado de sus incrementos a lo largo del periodo observado. Si bien, algunas variables como el costo total por hectárea y el DPI se encuentran disponibles hasta

febrero de 2015, la tierra n_{iv} únicamente se encuentra hasta diciembre de 2014, razón por la cual la entropía calculada acercara la producción entre enero de 1961 y diciembre de 2014.

El resultado obtenido equivale a 12'256,225.52 de dólares, esta es la entropía, cifra bastante reducida para tratarse de un periodo de más de 50 años, pero dado que las series no cumplen con los criterios de estabilidad, este no es en ningún caso un mínimo óptimo.

De cumplir dichas condiciones, se podría afirmar que el costo de mitigar la erosión promedio anual seria de 245,124.51 dólares, cifra que varía dependiendo de la cantidad de tierra cosechada. Este valor seria invertido en el empleo del manejo integrado de arvenses; como se observó en el trabajo de Cesar Alberto Serna Giraldo citado (citado en el apartado 2.3), la concepción de la gravedad y la intensidad de la erosión por parte de los caficultores es como muy suave y ligera, razón por la cual, una campaña de capacitación y concientización del problema podría influir positivamente en el DPI incrementando la cantidad de dinero que estarían dispuestos a invertir para mitigar la erosión, abarcando incluso otros fenómenos como los movimientos masales y el fenómeno de las cárcavas.

Capítulo 5

Conclusiones.

El Principio Extremal de Prigogine es una herramienta útil que permite aplicar análisis de ciencias naturales y ciencias duras como la física termodinámica a las ciencias sociales como la Economía al partir de la teoría del no equilibrio. En este caso se propuso emplear dicho principio para calcular el costo mínimo de la erosión que podrían asumir los productores para emplear practicas sustentables en el manejo de sus cultivos, todo ello se aplicó a la producción de café en Colombia; se validó la aplicabilidad mediante herramientas econométricas encontrando que no se cumplen las condiciones de estabilidad ni estacionariedad requeridas en dicho sistema.

Si bien son muy pocas las variables en economía que se pueden encontrar naturalmente en estado estacionario, estas pueden expresarse como tal a través de ciertas transformaciones, lo que a su vez modificaría el análisis del mínimo optimo encontrado; como la mayoría de las veces solo se requiere de la eliminación de una tendencia estocástica, basta con expresar las series en diferencias.

Con todo lo anterior se esperaba obtener un incremento en el costo oculto de la erosión mínimo óptimo según la disposición a invertir en dicho problema por parte de los caficultores, sin embargo algunas de las variables que definen el sistema, a pesar de estar expresadas en diferencias, demostrando su estado estacionario, no eran estructuralmente estables; hecho verificado mediante la aplicación de las pruebas de cointegración en el largo plazo y de estabilidad en el modelo VEC y del test de Dickey-Fuller y la prueba de Chow sobre cada variable individualmente, por lo cual, en este caso el principio extremal

de Prigogine no es aplicable, pues no se cumplen sus condiciones y por ende el valor encontrado de entropía no equivaldría a un mínimo óptimo concluyendo así que el sistema de producción de café en Colombia no es sostenible.

En este caso, la alta volatilidad del precio representativo del café (variable con mayor inestabilidad) afecta la sostenibilidad en la medida que el costo de mitigar la erosión es fijo y por ende las variaciones en los excedentes no incentivan a que los productores incurran constantemente en los costos que generan, por ejemplo el manejo integrado de arvenses.

El costo mínimo encontrado es bastante reducido como para tratarse de un periodo superior a los 50 años, esto puede deberse a la inestabilidad de los precios, lo que afecta el cálculo del pago que están dispuestos a asumir los productores para la mitigación o prevención de la erosión, adicional a ello, dicho valor puede ser en sí mismo inferior al requerido geológicamente para una recuperación óptima del suelo, pero lamentablemente en Colombia, dada la condición de información disponible, es difícil aproximarse a una valoración de este tipo.

A pesar de ello, se debe tener en cuenta que comparativamente con los costos totales de producir una tonelada, los costos por erosión contemplados en este trabajo son bastante altos. En los periodos en los que el precio del café sube y se incentiva la producción, el mayor flujo de tierra (recursos del suelo) hace que el costo por erosión supere incluso el 45% del costo total por tonelada, y aunque en los periodos en que el precio baja y se reduce la cantidad producida el costo por erosión es de aproximadamente el 20% del costo total, el promedio entre 1961 y 2014 se acerca al 48%.

Fernando Suarez de Castro evidencio este problema 35 años atrás; él autor menciona que *“los malos precios en los mercados de los productos agrícolas son otra circunstancia que incide directamente sobre la explotación excesiva de terrenos”* (Suearez de Castro, 1979) en los casos que la cadena de intermediarios hace que el precio no pueda ser fijado por el productor, las grandes fluctuaciones pueden llevar a unas temporadas en los que la cosecha no sea remuneradora y a otras en las que el precio sea atractivo para el cultivador, pero en cualquier caso las finanzas del productor se ven afectadas impidiéndole invertir en el cuidado del suelo.

Así mismo los pequeños productores son aun mayormente afectados ya que dadas las pequeñas extensiones de terreno, la volatilidad en los ingresos los llevaría a una explotación un poco más intensiva para poder subsistir, sumado a ello, como se ve en la tabla 22 de los anexos, los costos directos de un pequeño productor de café son más de 3 veces los de un productor grande, donde los principales rubros con mayor diferencia son los insumos y el mantenimiento del cultivo.

Es así como el sistema de explotación busca minimizar los gastos aunque ello signifique perdida en la fertilidad en el suelo. En ningún momento se pretende decir que el método de producción de café no pueda ser sostenible, en gran medida lo es, sin embargo la volatilidad en los precios afecta la implementación de dichas herramientas porque los pequeños productores tienen que maximizar los ingresos y reducir los costos en el corto plazo para poder subsistir.

Finalmente, se cree que en los primeros 30 años del periodo contemplado no se le presto mucho interés al tema de la mitigación y prevención de la erosión, (aunque como

se observó en el capítulo 2, ya se tenía conocimiento de la pérdida de suelo genera empleando métodos convencionales en el cultivo de café desde 1950) pues no fue sino hasta el Informe de Burtrand en 1987 que se empezó a tener un interés notorio por temas ambientales, por lo que gran parte de los costos por erosión se habrían internalizado a los excedentes de los intermediarios económicos, provocando pérdidas de suelo significativas.

En todo caso, ¿Qué medida podría contribuir a que la producción de café fuera sostenible en términos del costo?, en el caso del café colombiano el principal intermediario es la Federación Nacional de Cafeteros, por ende es uno de los principales fijadores de precios para los productores. Se propone crear un fondo de ahorro por parte de los intermediarios en el mercado cuya propensión marginal aumente directamente cuando los precios del café suben internacionalmente; cuando el precio sea lo suficientemente alto como para que el productor pueda asumir el costo, es el cultivador quien incurrirá en el no obstante cuando el precio sea demasiado bajo, el costo permanecerá estable pero será asumido por el fondo de ahorro de tal forma que no represente una carga para el productor.

Esta propensión al ahorro se debe justificar en términos de la productividad que conservan los suelos cuando se implementa el manejo integrado de arvenses, lo que a fin de cuentas se constituirá en un amortiguador ante la volatilidad del precio representativo manteniendo el costo oculto o “entropía” en los mínimos óptimos.

Lista de referencias

- Ayres, R. U. (1999). The Second Law, the Fourth Law, Recycling and Limits to Growth. *Ecological Economics*(29), 473 - 483.
- Baumgartner, S., Dyckhoff, H., Faber, M., Proops, J., & Schiller, J. (2001). The concept of joint production and ecological economics. *Ecological Economics*(36), 365 - 372.
- Bermejo Gómez de Segura, R. (2014). <http://www.hegoa.ehu.es/>. (A. Martínez, Ed.)
Obtenido de [http://www.hegoa.ehu.es/](http://www.hegoa.ehu.es/http://publicaciones.hegoa.ehu.es/assets/pdfs/315/Sostenibilidad_DHL.pdf?1399365095):
http://publicaciones.hegoa.ehu.es/assets/pdfs/315/Sostenibilidad_DHL.pdf?1399365095
- Bifani, P. (1999). *Medio ambiente y desarrollo sostenible*. Madrid: Instituto de Estudios Políticos para América Latina y África (IEPALA).
- Boulding, K. E. (Diciembre de 1981). Agricultural economics in an evolutionary perspective. *American Journal of Agricultural Economics*, 63(5), 788-795.
Obtenido de <http://www.jstor.org/stable/1241245>
- Cardenas, M. (2013). *Introducción a la Economía Colombiana*. Bogotá, Colombia: Alfaomega Colombiana S.A.
- Castiblanco R., C. (Diciembre de 2007). La economía ecológica: Una disciplina en busca de autor. *Revista Gestión y Ambiente*, 10(3), 7-22.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica*. México, D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. De C.V.

- Daly, H. E. (Mayo de 1974). The economics of the steady state. *The American Economic Review*, 64(2), 15-21. Obtenido de <http://www.jstor.org/stable/1816010>
- Escobar, A. (1995). El desarrollo sostenible: dialogo de discursos. *Ecología política*(9), 7 - 25.
- Georgescu-Rogen, N. (1996). *La Ley de la Entropía y El Proceso Económico*. Madrid, España: Harvard University Press.
- Guisán, M. C. (2002). Causalidad y cointegración en modelos econométricos: Aplicaciones a los países de la OCDE y limitaciones de los tests de cointegración. *University of Santiago de Compostela. Faculty of Economics. Econometrics. Working Paper Series Economic Development*.(61), 1 - 47.
- Gujarati, D. N. (2009). *Econometría*. Mexico D.F.: McGraw Hill.
- Hincapié Gómez, É., & Salazar Gutiérrez, L. F. (Mayo de 2007). Manejo integrado de arvenses en la zona cafetera central de Colombia. *Avances Tecnicos Cenicafe*(359), 1-12.
- Jaber, M. Y., Bonney, M., & Moualek, I. (2009). An economic order quantity model for an imperfect production process with entropy cost. *Elsevier*(118), 26 - 33.
- Kaberger, T., & Mansson, B. (2001). Entropy and economic processes - physics perspectives. *Ecological Economics*(36), 165 - 179.
- Morse, J. M., & Niehaus, L. (2009). *Mixed Method Desing: Principles and Procedures*. California: Walnut Creek.
- Quimitube.com. (08 de Abril de 2013). *Quimitube.com*. Obtenido de Quimitube.com: <https://www.youtube.com/watch?v=4DWx7U6X21s>

- Quiroz-Marín, T., & Hincapié-Gómez, E. (2007). Pérdidas de suelo por erosión en sistemas de producción de café con cultivos intercalados. *Cenicafé*, 58(3), 227-235.
- Ranjan, K., & Kaushik, S. (2013). Energy, exergy and thermo-economic analysis of solar distillation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(27), 709 - 723.
- Real Academia Española. (23 de Octubre de 2014). <http://lema.rae.es/>. Obtenido de <http://lema.rae.es/>: <http://lema.rae.es/drae/?val=entrop%C3%ADa>
- Reina, M., Zuluaga, S., & Rozo, M. (2006). *El sistema económico*. Bogotá D.C.: Banco de la República.
- Ricardo, D. (1993). *Principios de economía política y tributación* (Vol. 1). Santafé de Bogotá, D. C., Colombia: Fondo de Cultura Económica Ltda.
- Rivera Posada, J. H. (Febrero de 2005). http://www.oocities.org/biotropico_andino/. Obtenido de http://www.oocities.org/biotropico_andino/: http://www.oocities.org/biotropico_andino/cap11.pdf
- Rivera-Posada, J. H., Lal, R., Amézquita-Collazos, É., Mesa-Sánchez, Ó., & Chaves-Córdoba, B. (2010). Predicción de la erodabilidad en algunos suelos de ladera de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé*, 61(4), 344-357.
- Sachs, J. (1997). *Economic Developments*. Blackwell Publishers.
- Sachs, J. (2008). *Economía para un Planeta Abarrotado*. Debate.

- Salazar G., L. F., & Hincapié G., É. (Junio de 2006). Causas de los movimientos masales y erosión avanzada en la zona cafetera colombiana. *Avances Técnicos Cenicafé*(348), 1-8.
- Sciubba, E. (2013). Can an Environmental Indicator valid both at the local and global scales be derived on a thermodynamic basis? *Ecological Indicators*(29), 125 - 137.
- Serna-Giraldo, C. A. (2009). Valoración contingente de la erosión de los suelos de la zona cafetera central de Colombia. *Cenicafé*, 1(60), 86 - 104.
- Smith, A. (1776). *Investigación sobre la naturaleza y causas de la riqueza de las naciones*. Bogotá: Fondo de cultura Económica.
- Suarez de Castro, F. (1979). *Conservación de Suelos*. San José, Costa Rica: IICA.
- Teubal, M. (Junio de 2006). La renta de la tierra en la economía política clásica: David Ricardo. *REVISTA NERA*, 9(8), 122 - 132. doi:ISSN 1806-6755
- Tsirlin, A., & Kazakov, V. (2005). EXTREMAL PRINCIPLES AND LIMITING POSSIBILITIES OF OPEN THERMODYNAMIC AND ECONOMIC SYSTEMS. En S. Sieniutycz, & H. Farkas, *Variational and Extremum Principles in Macroscopic Systems* (págs. 735-751). Kidlington, Oxford OX5 1GB: ELSEVIER Ltd.
- Veblen, T. (2000). Limitaciones De La Utilidad Marginal. Cuadernos de Economía, Universidad Nacional de Colombia, 225-241.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning United States Department of Agriculture. Agricultural*

Handbook. Washington, D.C.: Science and Education Administration United States Department of Agriculture en cooperación con Purdue Agricultural Experiment Station.

Anexos

Calculo del IPP agrícola años anteriores a 1970

Para el cálculo del IPP agrícola en años anteriores a 1970 se empleó un método de encadenamiento de datos. Dado que ambas variables expresan un mismo fenómeno: la variación en el nivel de precios, la relación es bastante amplia.

Es a partir de 2011 donde según el DANE se cambia la metodología para el cálculo del IPP por ende se observa allí mayor discrepancia con respecto al IPC, sin embargo en los primeros años contemplados en este trabajo (1961 a 1990) la relación en los incrementos es bastante similar, ello es observable en la fuerte concentración de datos en valores inferiores a 10 indicando una variabilidad inferior con respecto al resto de periodos, esto se asocia también con la amplia distancia del año base del IPP (2014).

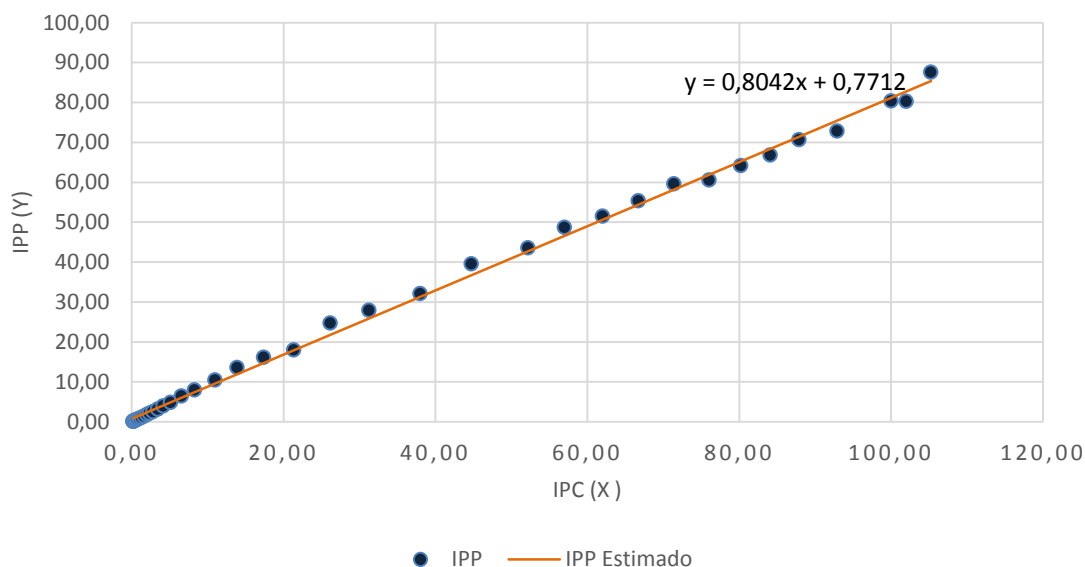


Figura 21. Calculo del IPP
Fuente: elaboración propia.

No se recurre a la estimación mediante una regresión ya que esto daría lugar a valores negativos, lo que carecería de sentido en términos de índices.

Estimación del costo total promedio por hectárea de café

El Ministerio de Agricultura tiene a disposición del ciudadano un sistema de información estadística agropecuaria en la página web www.agronet.gov.co, allí en la sección de “cifras de precios, costos insumos y abastecimientos” se encuentran los cálculos para los costos de producción de diferentes productos, entre ellos el café.

La información se desagrega por trimestre, región productora, tamaño del productor y tipo de cultivo (tecnificado o tradicional); se obtienen los datos para el cuarto trimestre del año 2010 y se clasifican en primer lugar según región, tamaño del productor y edad del cultivo.

Para cada región se unifica el identificador de cada partida del costo y se promedia el monto en promedio durante todos los años del cultivo especificados, este promedio se divide en el número de hectáreas máximo para pequeños productores (5 hectáreas o 7 en los casos en los que se indica así en los datos obtenidos), medio para medianos productores (10 hectáreas) y mínimo para grandes productores (20 hectáreas).

No todos los costos se dividen en el número de hectáreas, solo aquellos que dependen del tamaño del productor, existen partidas de costos fijos como lo son los costos indirectos, los empaques y algunos herbicidas e insecticidas.

Con todo lo anterior se obtienen las siguientes tablas:

Tabla 22. Costos promedio por hectárea de producción de café en Antioquia.

		Productor			Promedio
	Antioquia	Grande	Mediano	Pequeño	
1	COSTO DIRECTO	\$824,504.06	\$1,289,299.92	\$2,630,251.95	\$1,581,351.98
1.1	Adecuación Terreno	\$2,125.00	\$21,958.30	\$46,750.00	\$23,611.10
1.1.1	Adecuación	\$2,125.00	\$21,958.30	\$46,750.00	\$23,611.10
1.2	Mantenimiento Cultivo	\$26,296.88	\$100,583.33	\$140,604.15	\$89,161.45
1.2.1	Labores culturales	\$15,317.71	\$65,697.93	\$85,354.20	\$55,456.61
1.2.2	Aplicación insumos	\$10,979.18	\$34,885.40	\$55,250.00	\$33,704.86
1.3	Siembra	\$43,390.75	\$99,166.70	\$160,083.40	\$100,880.28
1.4	Cosecha	\$272,850.88	\$446,072.77	\$829,671.93	\$516,198.53
1.5	Beneficio en Finca	\$62,334.35	\$99,573.50	\$216,992.47	\$126,300.11
1.6	Insumos	\$390,791.20	\$494,837.33	\$1,200,399.00	\$695,342.51
1.6.1	Material propagación	\$69,736.65	\$119,140.00	\$281,480.00	\$156,785.55
1.6.2	Enmienda	\$10,371.50	\$32,149.40	\$89,309.20	\$43,943.37
1.6.3	Abono orgánico y acondicionadores	\$-	\$19,218.60	\$-	\$6,406.20
1.6.4	Fertilizantes edáficos	\$110,260.55	\$172,580.33	\$420,785.80	\$234,542.23
1.6.5	Fertilizantes foliares	\$3,700.00	\$11,900.00	\$13,689.00	\$9,763.00
1.6.6	Fungicidas	\$70,557.25	\$54,847.00	\$166,261.00	\$97,221.75
1.6.7	Insecticidas	\$69,632.25	\$44,040.00	\$114,997.00	\$76,223.08
1.6.8	Herbicidas	\$50,000.00	\$34,106.00	\$82,833.00	\$55,646.33
1.6.9	Coadyuvantes	\$6,533.00	\$6,856.00	\$31,044.00	\$14,811.00
1.7	Empaque	\$26,715.00	\$27,108.00	\$35,751.00	\$29,858.00
1.7.1	Otros	\$26,715.00	\$27,108.00	\$35,751.00	\$29,858.00
2	COSTO INDIRECTO	\$1,791,866.50	\$1,630,151.75	\$1,595,212.00	\$1,672,410.08
2.1	Arriendo	\$795,000.00	\$795,000.00	\$795,000.00	\$795,000.00
2.2	Asistencia técnica	\$308,414.00	\$205,609.00	\$320,751.00	\$278,258.00
2.3	Administración ¹	\$258,169.50	\$236,078.50	\$179,798.00	\$224,682.00
2.4	Imprevistos ²	\$430,283.00	\$393,464.25	\$299,663.00	\$374,470.08
3	COSTO TOTAL	\$2,616,370.56	\$2,919,451.67	\$4,225,463.95	\$3,253,762.06

Fuente: cálculos propios con datos Agronet

Tabla 23. Costos promedio por hectárea de producción de café en Eje Cafetero.

		Productor		Promedio
	Eje Cafetero	Grande	Pequeño	
1	COSTO DIRECTO	\$874,045.90	\$2,311,035.47	\$1,592,540.68
1.1	Adecuación Terreno	\$5,500.00	\$41,555.60	\$23,527.80
1.1.1	Preparación	\$5,500.00	\$41,555.60	\$23,527.80
1.2	Siembra	\$95,674.85	\$255,813.00	\$175,743.93
1.3	Mantenimiento Cultivo	\$47,395.05	\$284,044.47	\$165,719.76
1.3.1	Labores culturales	\$30,161.73	\$222,444.47	\$126,303.10
1.3.2	Aplicación insumos	\$17,233.32	\$61,600.00	\$39,416.66
1.4	Cosecha	\$282,504.60	\$836,556.00	\$559,530.30

1.5	Beneficio en Finca	\$89,752.15	\$197,487.60	\$143,619.88
1.6	Insumos	\$236,044.25	\$615,372.80	\$425,708.53
1.6.1	Material propagación	\$63,500.00	\$232,133.40	\$147,816.70
1.6.2	Enmienda	\$4,153.10	\$13,418.20	\$8,785.65
1.6.3	Abono orgánico y acondicionadores	\$18,391.45	\$38,953.60	\$28,672.53
1.6.4	Fertilizantes edáficos	\$70,980.70	\$260,388.27	\$165,684.48
1.6.5	Insecticidas	\$40,432.00	\$45,824.33	\$43,128.17
1.6.6	Herbicidas	\$38,587.00	\$24,655.00	\$31,621.00
1.7	Empaque	\$117,175.00	\$80,206.00	\$98,690.50
1.7.1	Bultos	\$101,460.00	\$80,206.00	\$90,833.00
1.7.2	Otros	\$15,715.00	\$-	\$7,857.50
2	COSTO INDIRECTO	\$1,896,190.67	\$1,778,878.67	\$1,837,534.67
2.1	Arriendo	\$1,200,000.00	\$1,200,000.00	\$1,200,000.00
2.2	Administración ¹	\$261,071.33	\$217,079.67	\$239,075.50
2.3	Imprevistos ²	\$435,119.33	\$361,799.00	\$398,459.17
3	COSTO TOTAL	\$2,770,236.57	\$4,089,914.13	\$3,430,075.35

Fuente: cálculos propios con datos Agronet

Tabla 24. Costos promedio por hectárea de producción de café en Tolima Grande.

		Productor		Promedio
	Tolima Grande	Mediano	Pequeño	
1	COSTO DIRECTO	\$1,173,405.03	\$2,242,419.53	\$1,707,912.28
1.1	Adecuación Terreno	\$16,895.20	\$39,963.60	\$28,429.40
1.1.1	Adecuación	\$16,895.20	\$39,963.60	\$28,429.40
1.2	Siembra	\$95,913.70	\$171,373.20	\$133,643.45
1.3	Mantenimiento Cultivo	\$80,607.62	\$176,197.04	\$128,402.33
1.3.1	Labores culturales	\$50,744.76	\$127,423.72	\$89,084.24
1.3.2	Aplicación insumos	\$29,862.84	\$48,773.32	\$39,318.08
1.4	Cosecha	\$278,468.18	\$425,262.65	\$351,865.41
1.5	Beneficio en Finca	\$56,076.98	\$93,871.20	\$74,974.09
1.6	Insumos	\$451,724.36	\$710,633.84	\$581,179.10
1.6.1	Material propagación	\$153,057.40	\$290,229.80	\$221,643.60
1.6.2	Enmienda	\$2,982.90	\$-	\$1,491.45
1.6.3	Fertilizantes edáficos	\$250,184.06	\$420,404.04	\$335,294.05
1.6.4	Fertilizantes foliares	\$4,952.00	\$-	\$2,476.00
1.6.5	Herbicidas	\$40,548.00	\$-	\$20,274.00
1.7	Transporte insumos	\$193,719.00	\$625,118.00	\$409,418.50
2	COSTO INDIRECTO	\$525,585.40	\$454,890.60	\$490,238.00
2.1	Administración ¹	\$197,094.40	\$170,583.80	\$183,839.10
2.2	Imprevistos ²	\$328,491.00	\$284,306.80	\$306,398.90
3	COSTO TOTAL	\$1,698,990.43	\$2,697,310.13	\$2,198,150.28

Fuente: cálculos propios con datos Agronet

Tabla 25. Costos promedio por hectárea de producción de café en Costa Atlántica.

		Productor
Costa Atlántica		Pequeño
1	COSTO DIRECTO	\$1,904,452.43
1.1	Adecuación Terreno	\$55,020.80
1.1.1	Adecuación	\$55,020.80
1.2	Siembra	\$78,187.50
1.3	Mantenimiento Cultivo	\$125,486.10
1.3.1	Labores culturales	\$104,636.13
1.3.2	Aplicación insumos	\$20,850.03
1.4	Cosecha	\$66,465.40
1.5	Beneficio en Finca	\$19,104.70
1.6	Insumos	\$323,891.93
1.6.1	Material propagación	\$250,000.00
1.6.2	Abono orgánico y acondicionadores	\$6,959.67
1.6.3	Fertilizantes edáficos	\$26,976.27
1.6.4	Insecticidas	\$39,956.00
1.7	Empaque	\$365,739.00
1.7.1	Bultos	\$365,739.00
1.8	Materiales	\$11,300.00
1.8.1	Amarres	\$11,300.00
1.9	Transporte insumos	\$859,257.00
2	COSTO INDIRECTO	\$613,905.33
2.1	Arriendo	\$264,889.00
2.2	Administración ¹	\$130,881.00
2.3	Imprevistos ²	\$218,135.33
3	COSTO TOTAL	\$2,518,357.77

Fuente: cálculos propios con datos Agronet

Tabla 26. Costos promedio por hectárea de producción de café en Cauca Nariño.

		Productor
Cauca Nariño Tradicional		Pequeño
1	COSTO DIRECTO	\$1,389,801.38
1.1	Adecuación Terreno	\$58,527.71
1.1.1	Adecuación	\$58,527.71
1.2	Siembra	\$68,099.57
1.3	Mantenimiento Cultivo	\$139,750.00
1.3.1	Labores culturales	\$106,902.76
1.3.2	Aplicación insumos	\$32,847.24
1.4	Cosecha	\$479,224.86
1.5	Beneficio en Finca	\$58,527.71
1.6	Insumos	\$496,763.52
1.6.1	Material propagación	\$237,857.14

1.6.2	Enmienda	\$19,176.71
1.6.3	Abono orgánico y acondicionadores	\$2,532.14
1.6.4	Fertilizantes edáficos	\$142,872.86
1.6.5	Fertilizantes foliares	\$15,113.67
1.6.6	Fungicidas	\$40,036.67
1.6.7	Insecticidas	\$23,096.00
1.6.8	Herbicidas	\$16,078.33
1.7	Empaque	\$88,908.00
1.7.1	Bultos	\$88,908.00
2	COSTO INDIRECTO	\$1,541,601.00
2.1	Arriendo	\$1,200,000.00
2.2	Administración ¹	\$128,100.33
2.3	Imprevistos ²	\$213,500.67
3	COSTO TOTAL	\$2,931,402.38

Fuente: cálculos propios con datos Agronet

Como se puede observar en las tablas anteriores, los costos totales promedio en cada región son relativamente similares, por lo que a partir de ellos se calcula un promedio nacional. Este dato se proyecta para los demás meses a partir del IPP agrícola mediante la siguiente ecuación:

$$Ct_{t-1} = \frac{C_t * IPP_{t-1}}{IPP_t} \quad (14)$$

Finalmente este valor se expresa en dólares dividiendo el costo promedio obtenido en la TRM de fin de mes y en dólares por tonelada multiplicando por el rendimiento del cultivo.

Transformaciones Box – Cox

Para poder expresar las series en forma estacionaria, se recurrió a la metodología Box – Cox, en la cual se trata de determinar un coeficiente “λ” que indicará el tipo de transformación que debe hacerse a la serie (Gujarati, 2009).

Como la periodicidad de las series es mensual, los datos para cada variable se dividen en 12 grupos de tamaños iguales, a los que se les calcula la media y la varianza, a

partir de allí se realizan estimaciones para determinar con qué valor de λ se obtiene un coeficiente de variación menor (pues este indicara el tipo de transformación a utilizar).

Tabla 27. Tipo de transformación según el valor de λ .

Valor de λ	Modelo de regresión
1	$Y_i = \beta_1 + \beta_2 X_i + u_i$
2	$Y_i^2 = \beta_1 + \beta_2 X_i + u_i$
0.5	$\sqrt{Y_i} = \beta_1 + \beta_2 X_i + u_i$
0	$\ln Y_i = \beta_1 + \beta_2 X_i + u_i$
-0.5	$\frac{1}{\sqrt{Y_i}} = \beta_1 + \beta_2 X_i + u_i$
-1.0	$\frac{1}{Y_i} = \beta_1 + \beta_2 X_i + u_i$

Fuente: (Gujarati, 2009)

Realizando los cálculos se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 28. Metodología Box - Cox: Toneladas producidas.

	μ	σ	λ				
			-1	-0.5	0	0.5	1
G1	38,114.44	13,744.20	0.00	0.00	0.36	70.40	13,744.20
G2	39,167.78	16,033.58	0.00	0.00	0.41	81.02	16,033.58
G3	38,873.33	17,122.17	0.00	0.00	0.44	86.84	17,122.17
G4	41,624.42	19,923.07	0.00	0.00	0.48	97.65	19,923.07
G5	61,975.56	25,071.54	0.00	0.00	0.40	100.71	25,071.54
G6	59,773.33	21,956.01	0.00	0.00	0.37	89.80	21,956.01
G7	68,296.67	34,557.61	0.00	0.00	0.51	132.23	34,557.61
G8	64,540.00	27,803.55	0.00	0.00	0.43	109.44	27,803.55
G9	53,236.67	16,576.90	0.00	0.00	0.31	71.85	16,576.90
G10	57,895.56	13,769.75	0.00	0.00	0.24	57.23	13,769.75
G11	53,014.44	14,826.02	0.00	0.00	0.28	64.39	14,826.02
G12	48,862.91	13,034.42	0.00	0.00	0.27	58.97	13,034.42
	μ		0.00	0.00	0.37	85.04	19,534.90
	σ		0.00	0.00	0.09	22.44	6,665.71
	CV		2.98	3.86	4.36	3.79	2.93
$\lambda = 1$							

Fuente: elaboración propia.

Tabla 29. Metodología Box - Cox: Hectáreas cosechadas.

	μ	σ	λ				
			-1	-0.5	0	0.5	1
G1	67,045.72	24,377.36	0.00	0.00	0.36	94.15	24,377.36
G2	66,608.88	27,210.51	0.00	0.00	0.41	105.43	27,210.51
G3	65,871.07	28,412.62	0.00	0.00	0.43	110.70	28,412.62
G4	69,546.05	32,114.47	0.00	0.00	0.46	121.78	32,114.47
G5	87,287.50	35,598.53	0.00	0.00	0.41	120.49	35,598.53
G6	80,669.88	31,358.06	0.00	0.00	0.39	110.41	31,358.06
G7	79,828.43	38,255.03	0.00	0.00	0.48	135.40	38,255.03
G8	76,449.74	31,693.88	0.00	0.00	0.41	114.63	31,693.88
G9	62,828.87	18,293.60	0.00	0.00	0.29	72.98	18,293.60
G10	63,587.80	15,356.21	0.00	0.00	0.24	60.90	15,356.21
G11	63,527.90	13,604.24	0.00	0.00	0.21	53.97	13,604.24
G12	77,957.17	15,165.84	0.00	0.00	0.19	54.32	15,165.84
	μ		0.0000	0.0013	0.3581	96.2627	25,953.36
	σ		0.0000	0.0003	0.0979	28.5152	8,498.34
	CV		3.8655	3.8346	3.6563	3.3758	3.0539

$\lambda = 1$

Fuente: elaboración propia.

Tabla 30. Metodología Box - Cox: Precio representativo del café.

	μ	σ	λ				
			-1	-0.5	0	0.5	1
G1	961.78	83.61	0.00	0.00	0.09	2.70	83.61
G2	941.79	70.04	0.00	0.00	0.07	2.28	70.04
G3	1,253.40	202.35	0.00	0.00	0.16	5.72	202.35
G4	1,832.56	1,362.09	0.00	0.02	0.74	31.82	1,362.09
G5	3,275.18	607.14	0.00	0.00	0.19	10.61	607.14
G6	3,317.13	731.85	0.00	0.00	0.22	12.71	731.85
G7	2,328.71	648.80	0.00	0.01	0.28	13.44	648.80
G8	2,781.55	1,044.98	0.00	0.01	0.38	19.81	1,044.98
G9	2,941.24	1,033.38	0.00	0.01	0.35	19.05	1,033.38
G10	1,786.39	491.89	0.00	0.01	0.28	11.64	491.89
G11	3,310.95	754.59	0.00	0.00	0.23	13.11	754.59

G12	4,626.38	1,140.33	0.00	0.00	0.25	16.77	1,140.33
	μ		0.00	0.01	0.27	13.30	680.92
	σ		0.00	0.00	0.18	8.16	420.07
	CV		1.29	1.41	1.54	1.63	1.62

$\lambda = -1$

Fuente: elaboración propia.

Tabla 31. Metodología Box - Cox: Costo total promedio por tonelada.

	μ	σ	λ				
			-1	-0.5	0	0.5	1
G1	160.74	14.76	0.00	0.01	0.09	1.16	14.76
G2	145.22	10.43	0.00	0.01	0.07	0.87	10.43
G3	178.81	34.81	0.00	0.01	0.19	2.60	34.81
G4	235.73	114.14	0.00	0.03	0.48	7.43	114.14
G5	674.24	85.30	0.00	0.00	0.13	3.29	85.30
G6	617.38	76.01	0.00	0.00	0.12	3.06	76.01
G7	584.40	45.11	0.00	0.00	0.08	1.87	45.11
G8	791.56	107.42	0.00	0.00	0.14	3.82	107.42
G9	873.43	93.30	0.00	0.00	0.11	3.16	93.30
G10	800.02	102.36	0.00	0.00	0.13	3.62	102.36
G11	1,207.30	168.45	0.00	0.00	0.14	4.85	168.45
G12	1,572.06	104.53	0.00	0.00	0.07	2.64	104.53
	μ		0.00	0.01	0.15	3.20	79.72
	σ		0.00	0.01	0.11	1.74	46.14
	CV		0.76	0.92	1.29	1.84	1.73

$\lambda = -1$

Fuente: elaboración propia.

Se concluye que solamente dos variables deben ser transformadas: el precio representativo y el costo total promedio, ambas en $1/Y$, es decir su inverso.

Estimación del modelo VEC

A continuación se presenta el cuadro de salida con los estimadores y los principales indicadores del modelo VEC expuesto en el capítulo 4 del trabajo. Las especificaciones sobre su Estacionariedad, causalidad, cointegración y condiciones ruido blanco se encuentran internas en el documento.

Tabla 32. Estimación modelo VEC

Vector Error Correction Estimates			
Sample (adjusted): 1961M04 2015M02			
Included observations: 647 after adjustments			
Standard errors in () & t-statistics in []			
Cointegrating Eq:	CointEq1		
$q_{iv} (-1)$	1.000000		
$P_i (-1)$	0.099244 (1.32821) [0.07472]		
$CT_{ha} (-1)$	-9.572725 (4.20109) [-2.27863]		
C	-46369.75 (2739.59) [-16.9258]		
Error Correction:	D(q_{iv})	D(P_i)	D(CT_{ha})
CointEq1	-0.564782 (0.04066) [-13.8901]	0.000209 (0.00051) [0.41207]	4.78E-05 (6.4E-05) [0.75043]
D($q_{iv} (-1)$)	0.239166 (0.04022) [5.94632]	-5.99E-05 (0.00050) [-0.11927]	-5.54E-05 (6.3E-05) [-0.87927]
D($q_{iv} (-2)$)	0.102392 (0.03929) [2.60633]	-0.000292 (0.00049) [-0.59560]	-4.99E-05 (6.2E-05) [-0.81102]
D($P_i (-1)$)	1.040902 (3.18254) [0.32707]	0.256781 (0.03973) [6.46385]	0.020205 (0.00498) [4.05547]
D($P_i (-2)$)	-1.875974 (3.22237)	0.071765 (0.04022)	0.007390 (0.00504)

	[-0.58217]	[1.78420]	[1.46504]
$D(CT_{ha} (-1))$	-4.331250 (25.4535) [-0.17016]	0.378921 (0.31772) [1.19262]	0.067052 (0.03985) [1.68276]
$D(CT_{ha} (-2))$	-23.25019 (25.2049) [-0.92245]	-0.783962 (0.31462) [-2.49180]	-0.024738 (0.03946) [-0.62695]
R-squared	0.255917	0.090033	0.043124
Adj. R-squared	0.248942	0.081502	0.034153
Sum sq. resids	2.10E+11	32743992	515015.0
S.E. equation	18120.81	226.1913	28.36743
F-statistic	36.68659	10.55372	4.807174
Log likelihood	-7258.250	-4422.168	-3078.905
Akaike AIC	22.45827	13.69140	9.539121
Schwarz SC	22.50666	13.73979	9.587508
Mean dependent	58.33076	4.525439	1.856784
S.D. dependent	20909.36	236.0135	28.86462
Determinant resid covariance (dof adj.)		1.32E+16	
Determinant resid covariance		1.28E+16	
Log likelihood		-14752.10	
Akaike information criterion		45.67882	
Schwarz criterion		45.85163	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 33. Test de autocorrelación de Portmanteau.

VEC Residual Portmanteau Tests for Autocorrelations					
Null Hypothesis: no residual autocorrelations up to lag h					
Sample: 1961M01 2015M05					
Included observations: 647					
Lags	Q-Stat	Prob.	Adj Q-Stat	Prob.	df
1	0.261569	NA*	0.261974	NA*	NA*
2	2.640611	NA*	2.648393	NA*	NA*
3	11.01096	0.8088	11.05774	0.8059	16
4	17.84563	0.8489	17.93492	0.8451	25
5	55.14778	0.0123	55.52758	0.0113	34
6	121.8641	0.0000	122.8684	0.0000	43
7	146.5627	0.0000	147.8371	0.0000	52
8	167.7905	0.0000	169.3307	0.0000	61
9	179.4506	0.0000	181.1552	0.0000	70
10	191.3016	0.0000	193.1923	0.0000	79
11	234.5616	0.0000	237.2006	0.0000	88
12	335.5396	0.0000	340.0868	0.0000	97

*The test is valid only for lags larger than the VAR lag order.

df is degrees of freedom for (approximate) chi-square distribution

Fuente: elaboración propia.

Tabla 34. Test de autocorrelación serial.

VEC Residual Serial Correlation LM Tests

Null Hypothesis: no serial correlation at
lag order h

Sample: 1961M01 2015M05

Included observations: 647

Lags	LM-Stat	Prob
1	18.35461	0.0313
2	48.37015	0.0000
3	10.17225	0.3367
4	8.007017	0.5334
5	40.08421	0.0000
6	72.09408	0.0000
7	27.55922	0.0011
8	22.87778	0.0065
9	12.42384	0.1905
10	12.62725	0.1802
11	45.73540	0.0000
12	116.1705	0.0000

Probs from chi-square with 9 df.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 35. Test de normalidad conjunta.

VEC Residual Normality Tests				
Orthogonalization: Cholesky (Lutkepohl)				
Null Hypothesis: residuals are multivariate normal				
Sample: 1961M01 2015M05				
Included observations: 647				
Component	Skewness	Chi-sq	df	Prob.
1	0.755924	61.61817	1	0.0000
2	0.542025	31.68047	1	0.0000
3	-0.118669	1.518546	1	0.2178
Joint		94.81718	3	0.0000
Component	Kurtosis	Chi-sq	df	Prob.
1	6.060227	252.4645	1	0.0000
2	10.64021	1573.632	1	0.0000
3	9.897661	1282.616	1	0.0000
Joint		3108.713	3	0.0000
Component	Jarque-Bera	df	Prob.	
1	314.0826	2	0.0000	
2	1605.313	2	0.0000	
3	1284.135	2	0.0000	
Joint	3203.530	6	0.0000	

Fuente: elaboración propia

Estimación del modelo SARIMA para las toneladas producidas (0, 1, 2) X (12, 0, 0)₁₂

En primer lugar se estima el correlograma de las toneladas producidas donde se identifica que la función de autocorrelación parcial decrece lentamente mientras que la función de autocorrelación simple decrece drásticamente, lo que da indicios de que la producción pueda ser explicada mediante los rezagos de la media móvil en la parte regular, sin embargo destaca el rezago 12 de la parte autorregresiva, por lo cual se incorpora en la parte estacional, el resultado obtenido es:

Tabla 36. Estimación SARIMA toneladas producidas.

Dependent Variable: SDQ_T				
Method: Least Squares				
Sample (adjusted): 1963M02 2015M02				
Included observations: 625 after adjustments				
Convergence achieved after 14 iterations				
MA Backcast: 1962M12 1963M01				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
AR(12)	-0.483302	0.035587	-13.58079	0.0000
MA(1)	-0.669058	0.039130	-17.09830	0.0000
MA(2)	-0.231074	0.039037	-5.919359	0.0000
R-squared	0.458683	Mean dependent var		-6.624000
Adjusted R-squared	0.456943	S.D. dependent var		23199.82
S.E. of regression	17096.51	Akaike info criterion		22.33592
Sum squared resid	1.82E+11	Schwarz criterion		22.35723
Log likelihood	-6976.976	Hannan-Quinn criter.		22.34420
Durbin-Watson stat	1.930937			
Inverted AR Roots	.91+.24i	.91-.24i	.67-.67i	.67+.67i
	.24-.91i	.24+.91i	-.24+.91i	-.24-.91i
	-.67-.67i	-.67-.67i	-.91-.24i	-.91+.24i
Inverted MA Roots	.92	-.25		

Fuente: elaboración propia

Con respecto a este resultado cabe hacer algunas aclaraciones: la producción de café presenta una estacionalidad fuerte debido a sus características de “bien agrícola”, entre ellas se puede mencionar la periodicidad del clima en las diferentes regiones productoras, así como los periodos de siembra y cosecha.

Dicho componente estacional no es eliminado del todo al aplicar diferencias estacionales, por lo que el modelo incorpora componentes estacionales en su formulación, sin embargo se podría recurrir a algún otro tipo de métodos, como por ejemplo a la suavización exponencial o a la desestacionalización por promedio móvil.

Se realizaron las 3 opciones mencionadas anteriormente, sin embargo la eliminación de la estacionalidad por suavizado o por desestacionalización generan dificultades en la modelación con respecto a sus rezagos, ya que a pesar de incorporar aquellos rezagos que indica el Correlograma tanto en su componente autorregresivo como en su componente de media móvil, la presencia de autocorrelación en los residuos es bástate fuerte.

Existe un gran componente explicativo que no es fácil de identificar para obtener un modelo que elimine dicha autocorrelación, de hecho, ni siquiera el modelo SARIMA planteado lo hace, sin embargo se conserva dado que en términos de formulación es más sencillo y, no se requiere como tal para explicar a la variable sino para realizar las diferentes pruebas de Chow en las fechas en las que se identifican posibles cambios estructurales en la serie.

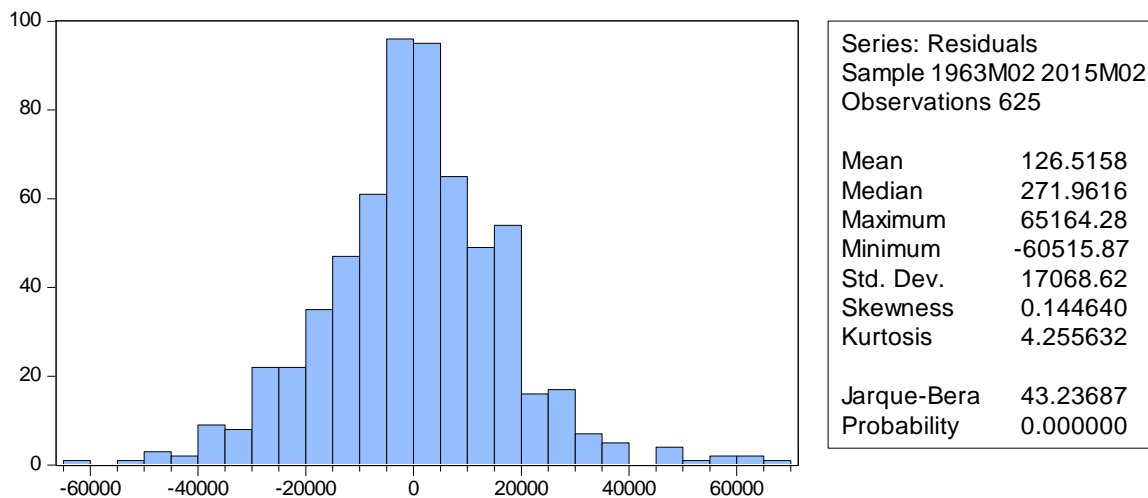


Figura 22. Test de normalidad SARIMA toneladas producidas.
Fuente: elaboración propia.

La alta correlación en los residuos se refleja en una concentración de los mismos con respecto a su media, lo que impide que se distribuyan normalmente. Como se observa en el Correlograma el componente estacional puede llegar incluso hasta el segundo año anterior, pero su inclusión simplemente incrementa el grado de autocorrelación en los residuos (aunque el estadístico Durbin Watson se aproxime más a 2).

Sample: 1963M02 2015M02
 Included observations: 625
 Q-statistic probabilities adjusted for 3 ARMA term(s)

































Autocorrelation	Partial Correlation		AC	PAC	Q-Stat	Prob
		1	0.034	0.034	0.7168	
		2	0.126	0.125	10.746	
		3	-0.041	-0.050	11.817	
		4	-0.077	-0.092	15.556	0.000
		5	0.003	0.021	15.563	0.000
		6	0.090	0.113	20.680	0.000
		7	0.068	0.053	23.630	0.000
		8	0.008	-0.032	23.672	0.000
		9	0.021	0.014	23.942	0.001
		10	-0.107	-0.086	31.284	0.000
		11	0.030	0.042	31.866	0.000
		12	-0.138	-0.130	44.115	0.000
		13	0.003	-0.015	44.123	0.000
		14	0.035	0.059	44.900	0.000
		15	0.009	0.004	44.948	0.000
		16	-0.030	-0.054	45.521	0.000
		17	-0.058	-0.054	47.706	0.000
		18	-0.086	-0.044	52.455	0.000
		19	-0.024	0.015	52.840	0.000
		20	-0.037	-0.054	53.735	0.000
		21	-0.002	-0.009	53.737	0.000
		22	0.005	-0.011	53.756	0.000
		23	-0.034	-0.012	54.529	0.000
		24	-0.278	-0.299	104.76	0.000

Figura 23. Prueba Q de autocorrelación en los residuos SARIMA toneladas producidas.
 Fuente: elaboración propia.

Estimación del modelo GARCH para el precio representativo del café

Nuevamente se parte del Correlograma en donde se identifica que el precio puede ser explicado por su valor del mes anterior y su valor 15 meses atrás, sin embargo la volatilidad es tan alta que es complicado que los residuales se distribuyan de forma normal, por esta razón se hace necesario modelar la varianza obteniendo un modelo GARCH de la siguiente forma:

Tabla 37. Estimación GARCH precio representativo del café.

Dependent Variable: DBXCP_DT
Method: ML - ARCH (Marquardt) - Student's t distribution
Sample (adjusted): 1962M05 2015M02
Included observations: 634 after adjustments
Convergence achieved after 28 iterations
Presample variance: backcast (parameter = 0.7)
GARCH = C(3) + C(4)*RESID(-1)^2 + C(5)*RESID(-2)^2 + C(6)*GARCH(-1)

Variable	Coefficient	Std. Error	z-Statistic	Prob.
AR(1)	0.197376	0.043419	4.545881	0.0000
AR(15)	-0.101668	0.032427	-3.135237	0.0017
Variance Equation				
C	4.08E-12	3.93E-12	1.037708	0.2994
RESID(-1)^2	0.330542	0.097149	3.402435	0.0007
RESID(-2)^2	-0.233951	0.095272	-2.455619	0.0141
GARCH(-1)	0.914583	0.023759	38.49494	0.0000
T-DIST. DOF	4.237105	0.692486	6.118687	0.0000
R-squared	0.069756	Mean dependent var		-1.32E-06
Adjusted R-squared	0.068285	S.D. dependent var		3.07E-05
S.E. of regression	2.97E-05	Akaike info criterion		-18.29977
Sum squared resid	5.56E-07	Schwarz criterion		-18.25062
Log likelihood	5808.027	Hannan-Quinn criter.		-18.28068
Durbin-Watson stat	1.912873			
Inverted AR Roots	.85+.18i	.85-.18i	.71-.50i	.71+.50i
	.44+.74i	.44-.74i	.10+.85i	.10-.85i
	-.25+.82i	-.25-.82i	-.56+.64i	-.56-.64i
	-.77-.35i	-.77+.35i	-.85	

Fuente: elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente la volatilidad del precio hizo necesaria la modelación de la varianza a través de un modelo GARCH, aunque ya se expusieron los resultados de las estimaciones, a continuación se mostrará que los residuos en dicho modelo no se encuentran correlacionados según la prueba Q y se ajustan relativamente bien a una distribución t student.

La hipótesis nula del test de autocorrelación Q afirma que los residuos no están autocorrelacionados si los coeficientes de las funciones de autocorrelación simple y autocorrelación parcial son estadísticamente insignificantes, a un nivel de significancia del 5% se acepta dicha hipótesis como se puede observar en la figura 22.

Sample: 1962M05 2015M02
 Included observations: 634
 Q-statistic probabilities adjusted for 2 ARMA term(s)

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob
		1	0.046	0.046	1.3362
		2	0.034	0.032	2.0791
		3	0.001	-0.002	2.0793
		4	-0.001	-0.002	2.0805
		5	-0.071	-0.071	5.3047
		6	0.010	0.016	5.3669
		7	0.041	0.045	6.4453
		8	-0.038	-0.043	7.3834
		9	-0.010	-0.010	7.4543
		10	0.024	0.023	7.8414
		11	-0.018	-0.017	8.0406
		12	0.000	0.006	8.0407
		13	-0.036	-0.042	8.8709
		14	-0.038	-0.037	9.7949
		15	-0.006	0.008	9.8186
		16	-0.008	-0.009	9.8610
		17	-0.011	-0.012	9.9350
		18	0.043	0.043	11.137
		19	0.016	0.008	11.311
		20	-0.033	-0.034	12.036
		21	-0.009	-0.007	12.094
		22	0.015	0.012	12.234
		23	-0.028	-0.021	12.747
		24	-0.011	-0.008	12.826

Figura 24. Prueba Q de autocorrelación en los residuos GARCH precio representativo del café
 Fuente: elaboración propia.

Para el ajuste de los residuos a la distribución t student se presenta un gráfico Quantile – Quantile donde la línea recta representa la distribución teórica y los puntos, la distribución real. Se observa que de 634 observaciones, son muy pocas las que se alejan de la distribución teórica y que ellas corresponden a los valores extremos en la serie (iniciales y finales), pero que en general si se puede afirmar que los residuos tienden a distribuirse como una t student.

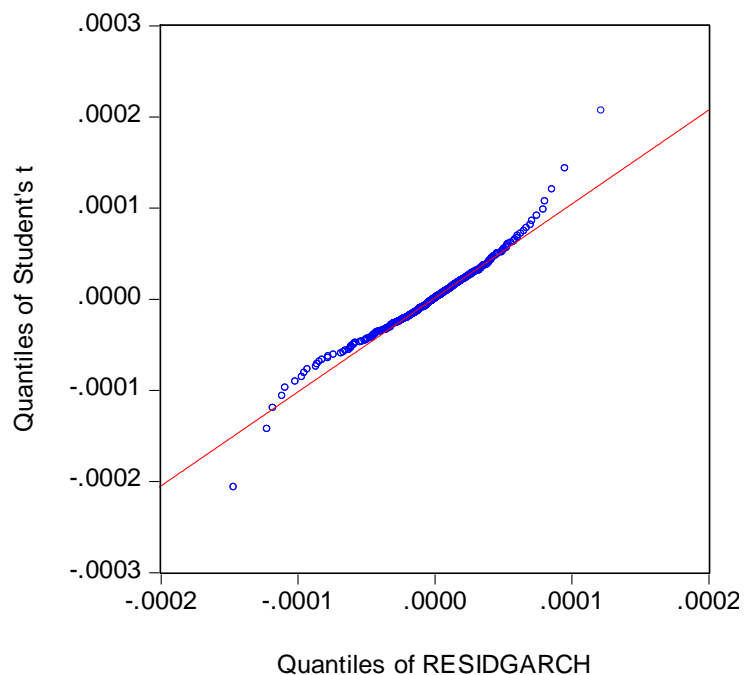


Figura 25. Ajuste de los residuos modelo GARCH del precio a la distribución t student
Fuente: elaboración propia.

Estimación del modelo GARCH para el coto total promedio por hectárea de café.

En el Correlograma de esta variable, se observa que son pocos los rezagos que sobre salen tanto en la función de autocorrelación simple como en la función de autocorrelación parcial, siendo los más destacados el AR(1) y el MA(1). Pero incorporar ambos en el modelo hace que sus estimadores sean estadísticamente insignificativos, razón por la cual se deja únicamente el AR(1). Al igual que con el precio representativo, los valores del costo presentan una alta volatilidad, esto agravado por el hecho de que la metodología a través de la cual se proyectó haga que refleje toda la dinámica inflacionaria del sector agrícola durante el periodo entre enero de 1961 y febrero de 2015; estas razones explican la dificultad de los residuos para distribuirse de manera normal y

ser homocedasticos, razón por la cual se modela la varianza y el modelo final es un GARCH de las siguientes características:

Tabla 38. Modelo GARCH costo total promedio por hectárea

Dependent Variable: DBXCCTDH				
Method: ML - ARCH (Marquardt) - Student's t distribution				
Sample (adjusted): 1961M03 2015M02				
Included observations: 648 after adjustments				
Convergence achieved after 34 iterations				
Presample variance: backcast (parameter = 0.7)				
GARCH = C(2) + C(3)*RESID(-1)^2 + C(4)*GARCH(-1)				
Variable	Coefficient	Std. Error	z-Statistic	Prob.
AR(1)	0.327137	0.040087	8.160613	0.0000
Variance Equation				
C	3.10E-10	8.98E-11	3.454741	0.0006
RESID(-1)^2	0.567565	0.145673	3.896152	0.0001
GARCH(-1)	0.543437	0.052915	10.27006	0.0000
T-DIST. DOF	3.161656	0.246999	12.80027	0.0000
R-squared	-0.048493	Mean dependent var		-9.33E-06
Adjusted R-squared	-0.048493	S.D. dependent var		0.000134
S.E. of regression	0.000138	Akaike info criterion		-17.11376
Sum squared resid	1.23E-05	Schwarz criterion		-17.07924
Log likelihood	5549.859	Hannan-Quinn criter.		-17.10037
Durbin-Watson stat	2.415432			
Inverted AR Roots	.33			

Fuente: elaboración propia.

Los residuales obedecen una distribución t Student. Aplicando la prueba Q para la detección de autocorrelación, se debe aceptar la hipótesis nula y se afirma que los residuos no están autocorrelacionados (figura 24).

Por otro lado, para verificar el ajuste de los residuos a la distribución t Student, se emplea un gráfico Quantile – Quantile, el cual indica los puntos de distancia con respecto a la media (que está representada por una línea recta). Al igual que con los demás gráficos de este tipo, cuanto más próximos estén los puntos a la línea, mejor será el ajuste a la distribución.

Sample: 1961M03 2015M02
Included observations: 648
Q-statistic probabilities adjusted for 1 ARMA term(s)

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob
		1	-0.010	-0.010	0.0691
		2	0.008	0.008	0.1138
		3	-0.018	-0.018	0.3294
		4	-0.012	-0.013	0.4309
		5	-0.015	-0.015	0.5738
		6	-0.017	-0.017	0.7577
		7	0.010	0.009	0.8211
		8	-0.018	-0.019	1.0442
		9	0.011	0.009	1.1205
		10	-0.014	-0.014	1.2571
		11	0.008	0.007	1.2988
		12	-0.002	-0.002	1.3024
		13	0.000	-0.000	1.3025
		14	0.014	0.014	1.4336
		15	0.008	0.008	1.4714
		16	-0.034	-0.035	2.2243
		17	-0.021	-0.021	2.5282
		18	-0.056	-0.057	4.6561
		19	0.046	0.045	6.0711
		20	-0.009	-0.009	6.1266
		21	0.006	0.002	6.1501
		22	0.003	0.002	6.1573
		23	0.020	0.020	6.4403
		24	0.004	0.003	6.4517

Figura 26. Prueba Q de autocorrelación en los residuos: modelo GARCH costo promedio por tonelada.

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 25, los puntos de distancia a la media se encuentran en una escala bastante reducida y a pesar de ello son pocos (de 635 observaciones), los que se distancian significativamente de la media, con lo cual se afirma que los residuos tienden a obedecer una distribución de probabilidad t Student.

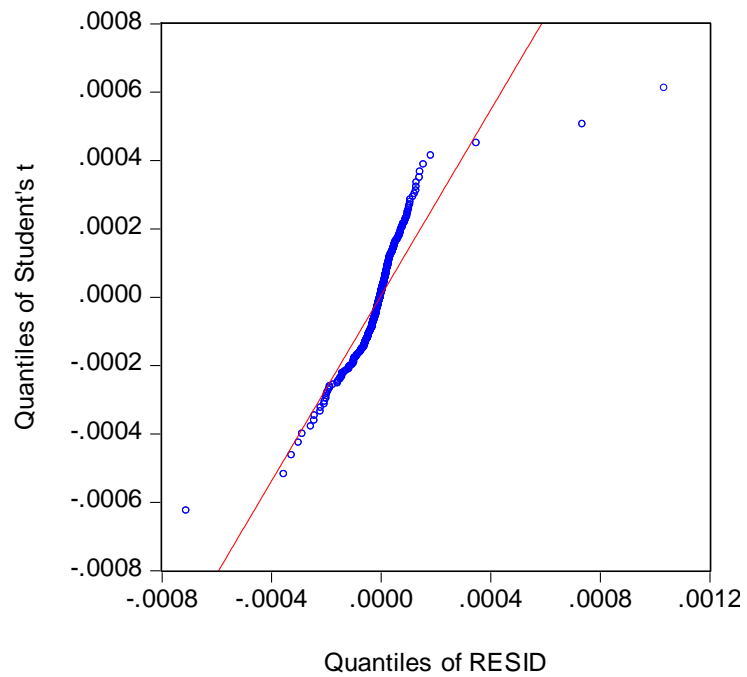


Figura 27. Grafico *Quantile - Quantile*, ajuste de los residuos modelo ARCH a una distribución simétrica.

Fuente: elaboración propia.

